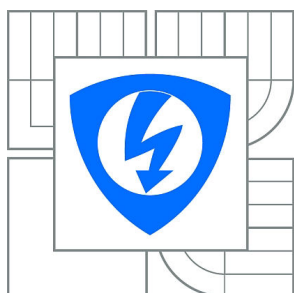


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS**

ŠIROKOPÁSMOVÉ LINEÁRNÍ ANTÉNNÍ POLE PRO BAN APLIKACE

BROADBAND LINEAR ANTENNA ARRAY FOR BAN APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

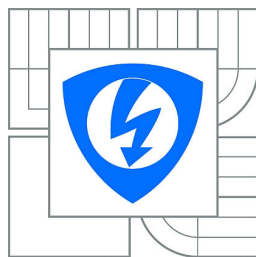
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ GAJA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN PUSKELY, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Tomáš Gaja

Ročník: 3

ID: 147396

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Širokopásmové lineární anténní pole pro BAN aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti širokopásmových antén a zaměřte se na stabilitu jejich vyzařovací charakteristiky s kmitočtem. Navrhněte a ve vybraném simulátoru elektromagnetického pole namodelujte vybranou konstrukci antény a ověřte její funkci v blízkosti fantomu lidské tkáně. Pracovní kmitočet volte z rozsahu nelicencovaných pásem ISM.

V další fázi navrhněte a namodelujte lineární pole sestavené z osmi elementů zvolené antény a vyšetřete vliv blízkosti fantomu lidské tkáně. Anténní pole realizujte a experimentálně ověřte jeho vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, A. C. Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.

[2] HALL, P. S.; HAO, Y., Antennas and propagation for body centric communications, Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on , vol., no., pp.1,7, 6-10 Nov. 2006.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jan Puskely, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a praktickou realizací jednotlivého elementu anténní řady a simulací celé řady pro aplikaci v BAN. Práce pojednává o základních principech směřování svazku anténní řady do specifického poloprostoru s potlačením nežádoucích postranních laloků. Na základě těchto principů je vytvořen skript v programovacím prostředí MATLAB, který efektivně analyzuje vlastnosti anténní řady. Další část práce řeší návrh úzkopásmové flíčkové antény a širokopásmové Vivaldi antény v pásmu ISM 5,8 GHz a napájecí síť pro anténní řady. Anténní řady byly ověřeny v simulátoru elektromagnetického pole CST a to včetně jejich funkcí a vlastností v blízkosti fantomu lidské tkáně. Tyto simulace byly experimentálně provedeny pouze pro jeden element anténní řady. Výsledky z naměřených vyzařovacích charakteristik byly ve skriptu vyšetřeny jako řada o osmi elementech.

KLÍČOVÁ SLOVA

flíčková anténa, Vivaldi anténa, anténní řada, vychylování hlavního laloku, Dolph-Chebysevo rozložení, BAN aplikace, lidská tkáň

ABSTRACT

The work deals with the design and the practical realization of a single element of antenna arrays and with the simulation of all elements of antenna arrays for application in BAN. The main attention is focused on the shaping of radiation pattern with suppression of unwanted side lobes. Based on these principles the script was created in MATLAB environment which effectively analyses features of each desired antenna array. The next section of this work is focused on design of narrowband Patch antenna and broadband Vivaldi antenna in frequency band ISM 5.8 GHz and supply network for antenna arrays. Designed antenna arrays were verified in simulator of electromagnetic field CST including their function and features in proximity of human tissue. These simulations were experimentally made only for a single element of antenna arrays. The results from measured radiation pattern were analyzed in script as array about eight elements.

KEYWORDS

Patch antenna, Vivaldi antenna, antenna array, shaping of radiation pattern, Dolph-Chebysev suppression of lobes, BAN application, human tissue

GAJA, Tomáš *Širokopásmové lineární anténní pole pro BAN aplikace*: bakalářská práce. Místo: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 56 s. Vedoucí práce byl Ing. Jan Puskely, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Širokopásmové lineární anténní pole pro BAN aplikace“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Místo

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování za poskytnutí podkladů, cenných informací, odborné konzultace patří především mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Janu Puskelymu, Ph.D., kterému chci rovněž touto cestou poděkovat za ochotu, vstřícnost a trpělivost v souvislosti s dokončením bakalářské práce. Velké poděkování patří také Ing. Michalovi Pokornému, Ph.D. za odborné vedení práce.

Místo

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Místo

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	1
1 Základní terminologie	2
1.1 Záření elementárních zdrojů	2
1.2 Parametry antény	3
1.3 Body Area Network	4
2 Anténní lineární řada	5
2.1 Účel anténní lineární řady	5
2.2 Analytický popis anténní řady	5
2.3 Budící vektor	7
2.4 Redukce postranních laloků	9
3 Návrhy a simulace antén v CST	13
3.1 Volba antény	13
3.2 Flíčková anténa	13
3.3 Vivaldi anténa	17
4 Napájecí síť	20
4.1 Síť pro řadu Vivaldi antén	21
4.2 Síť pro řadu flíčkových antén	26
5 Simulace antény v blízkosti lidské tkáně	30
5.1 Vivaldi anténa v blízkosti fantomu	31
5.2 Anténní řada Vivaldi v blízkosti fantomu	33
5.3 Flíčková anténa v blízkosti fantomu	34
5.4 Anténní flíčková řada v blízkosti fantomu	36
6 Praktická realizace jednotlivého elementu řady	38
6.1 Vivaldi anténa	38
6.2 Vivaldi anténa v blízkosti fantomu	40
6.3 Flíčková anténa	43
6.4 Flíčková anténa v blízkosti fantomu	46
7 Závěr	49
Literatura	50
Seznam symbolů, veličin a zkratk	51

Seznam příloh	52
A Skript anténní řady	53
B Podklady pro výrobu antén	54
C Obsah přiloženého CD	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Intenzita pole dipólu	2
1.2	Normovaná vyzařovací charakteristika intenzity \mathbf{E} dipólu [2]	2
1.3	Vymezení hlavního laloku [2]	3
2.1	Umístění třech bodových zářičů [5]	5
2.2	Výpočet záření pro úhly θ od 0° do 180°	6
2.3	Vyzařovací charakteristiky izotropního zářiče: a) $d = 0,25\lambda$ b) $d = 0,5\lambda$ c) $d = \lambda$	7
2.4	Směr vyzařování	8
2.5	Fázová vzdálenost	8
2.6	Řada s vychýlením hlavního svazku do specifického úhlu: a) 30° b) 45°	9
2.7	Schéma redukce vzorků pomocí Hannova okna	9
2.8	Hannova redukce postranního laloku: a) Bez použití Hannova okna, $\Delta\phi_{3dB} = 10^\circ$ b) S použitím Hannova okna, $\Delta\phi_{3dB} = 16^\circ$	10
2.9	Dolph-Chebyshev metoda [6]	11
2.10	Dolph-Chebyshev redukce: a) $SL = 10$ dB, $\Delta\phi_{3dB} = 10^\circ$ b) $SL = 20$ dB, $\Delta\phi_{3dB} = 12,2^\circ$ c) $SL = 30$ dB, $\Delta\phi_{3dB} = 14,4^\circ$	12
3.1	Model flíčkové antény vytvořený v programu CST	14
3.2	Činitel odrazu na vstupu flíčkové antény	15
3.3	Normované vyzařovací charakteristiky flíčkové antény při frekvenci 5,8 GHz	15
3.4	Vyzařování flíčkové antény při frekvenci 5,8 GHz	16
3.5	Flíčková anténní řada: a) Načtená data jednoho elementu flíčkové antény z CST b) Řada flíčkových elementů: $n = 8$, $\varphi = 0^\circ$, $SL = -28$ dB	16
3.6	Model Vivaldi antény vytvořený v simulátoru CST	17
3.7	Činitel odrazu na vstupu Vivaldi antény	18
3.8	Vyzařování Vivaldi antény při frekvenci 5,8 GHz	18
3.9	Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi antény: Červená 5,8 GHz; Zelená 7 GHz; Modrá 8 GHz; Černá 10 GHz	19
3.10	Anténní řada Vivaldi: a) Načtená data jednoho elementu Vivaldi antény z CST b) Řada Vivaldi elementů: $n = 8$, $\varphi = 0^\circ$, $SL = -31$ dB	19
4.1	Dělič typu T [10]	20
4.2	Poměry amplitud jednotlivých děličů	21
4.3	Impedance jednotlivých děličů napájecí sítě pro Vivaldi řadu	22
4.4	Činitel odrazu na vstupu napájecí sítě pro řadu Vivaldi	23

4.5	Simulace pro ověření budícího vektoru pro řadu Vivaldi antén: a) Elementy napájeny jednotlivě bez napájecí sítě b) Odpovídající vyzařovací charakteristiky při frekvenci 5,8 GHz	23
4.6	Model anténní řady Vivaldi s pohledem bez substrátu	24
4.7	Činitel odrazu na vstupu Vivaldi řady	24
4.8	Normované Vyzařovací charakteristiky Vivaldi řady při frekvenci 5,8 GHz: červená SMA, modrá bez SMA	25
4.9	Vyzařování Vivaldi řady při frekvenci 5,8 GHz	25
4.10	Simulace pro stanovení vzdálenosti jednotlivých elementů: a) Výsledná vzdálenost dvou elementů řady b) Odpovídající přenos při frekvenci 5,8 GHz	26
4.11	Simulace pro ověření budícího vektoru pro řadu flíčkových antén: a) Elementy napájeny jednotlivě bez napájecí sítě b) Odpovídající vyzařovací charakteristiky při frekvenci 5,8 GHz	27
4.12	Napájecí síť pro flíčkovou řadu antén	27
4.13	Činitel odrazu na vstupu napájecí sítě bez flíčkových elementů	28
4.14	Model flíčkové řady	28
4.15	Činitel odrazu na vstupu řady flíčkových elementů	29
4.16	Normované vyzařovací charakteristiky řady flíčkových elementů při frekvenci 5,8 GHz: červená barva- SMA, modrá barva - bez SMA	29
4.17	Vyzařování flíčkové řady při frekvenci 5,8 GHz	29
5.1	Složení lidské tkáně	30
5.2	Boční pohled měření antény v blízkosti lidské tkáně	31
5.3	Činitel odrazu na vstupu Vivaldi antény v blízkosti fantomu	31
5.4	Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně	32
5.5	Vyzařování Vivaldi antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: a) bez tkáně b) s tkání	32
5.6	Činitel odrazu na vstupu anténní řady Vivaldi v blízkosti fantomu	33
5.7	Normované vyzařovací charakteristiky anténní řady Vivaldi v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně	34
5.8	Vyzařování anténní řady Vivaldi v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: a) bez tkáně b) s tkání	34
5.9	Činitel odrazu na vstupu flíčkové antény v blízkosti fantomu	35
5.10	Normované vyzařovací charakteristiky flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně	35

5.11	Vyzařování flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz:	
	a) bez tkáně b) s tkání	36
5.12	Činitel odrazu na vstupu anténní flíčkové řady v blízkosti fantomu . .	36
5.13	Normované vyzařovací charakteristiky anténní flíčkové řady v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně	37
5.14	Vyzařování anténní flíčkové řady v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: a) bez tkáně b) s tkání	37
6.1	Vyrobená anténa Vivaldi: a) Přední část b) Zadní část	38
6.2	Činitel odrazu na vstupu vyrobené Vivaldi antény	38
6.3	Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi antény při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez xz)	39
6.4	Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi řady o osmi elementech: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez xz)	40
6.5	Měření činitele odrazu vyrobené Vivaldi antény v blízkosti fantomu .	40
6.6	Činitel odrazu na vstupu vyrobené Vivaldi antény v blízkosti fantomu	41
6.7	Měření vyzařovacích charakteristik vyrobené Vivaldi antény v bezodrazové komoře	41
6.8	Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi antény v blízkosti fantomu: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez yz)	42
6.9	Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi řady v blízkosti fantomu: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez yz)	42
6.10	Vyrobená flíčková anténa	43
6.11	Činitel odrazu na vstupu vyrobené flíčkové anténě	43
6.12	Závislost činitele odrazu při změně permitivity substrátu	44
6.13	Normované vyzařovací charakteristiky vyrobené flíčkové antény při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)	44
6.14	Normované vyzařovací charakteristiky anténní flíčkové řady při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)	45
6.15	Měření činitele odrazu vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu .	46
6.16	Činitel odrazu na vstupu vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu	46

6.17	Normované vyzařovací charakteristiky vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)	47
6.18	Normované vyzařovací charakteristiky vyrobené flíčkové řady v blízkosti fantomu při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)	48
A.1	Skript pro syntézu anténního pole	53
B.1	Přední a zadní pohled Vivaldi antény	54
B.2	Přední pohled flíčkové antény	54

SEZNAM TABULEK

3.1	Parametry flíčkové antény při frekvenci 5,8 GHz	16
3.2	Parametry Vivaldi antény v závislosti na frekvenci	18
4.1	Parametry pro řadu Vivaldi elementů při frekvenci 5,8 GHz	23
4.2	Parametry pro řadu flíčkových elementů při frekvenci 5,8 GHz	28
5.1	Vlastnosti lidské tkáně při frekvenci 5,8 GHz [11]	30
5.2	Parametry pro Vivaldi anténu v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz	32
5.3	Parametry pro řadu Vivaldi elementů v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz	33
5.4	Parametry pro flíčkovou anténu v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz	35
5.5	Parametry pro flíčkovou anténní řadu v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz	37
6.1	Parametry vyrobené Vivaldi antény při frekvenci 5,8 GHz	39
6.2	Parametry vyrobené Vivaldi antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz	41
6.3	Parametry vyrobené flíčkové antény při frekvenci 6 GHz	45
6.4	Parametry vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 6 GHz	47

ÚVOD

Při návrhu anténních řad se klade důraz na napájení jednotlivých elementů s danou amplitudou a fází. Pro docílení požadovaného tvaru vyzařovací charakteristiky se používají různé návrhové vztahy například Dolph-Chebyshevo rozložení [1], Taylorovo rozložení atd. Větší počet prvků v anténní řadě umožňuje dosažení vyššího zisku s lepším směřováním hlavního laloku a možností lepšího potlačení bočních laloků. Podle fázování jednotlivých elementů lze směřovat hlavní lalok anténní řady do libovolného místa v poloprostoru. Různým rozložením amplitud a fází lze anténní řadu využít v různých aplikacích, např. v radarech, v komunikačních systémech point-to-point, BAN (Body Area Network) atd.

Práce se skládá ze dvou částí. První část analyzuje vlastnosti anténní řady, zejména směřování vyzařovacích charakteristik v požadovaném směru. Výstupem je skript vytvořen v programovacím prostředí MATLAB, který dokáže pracovat s charakteristikou jednoho anténního prvku a analyticky syntetizovat celé anténní pole včetně jeho buzení, které zajišťuje vyzařování do zvoleného směru se zvolenou úrovní bočních laloků.

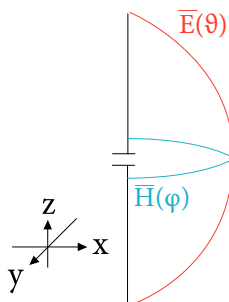
Druhá část se zabývá návrhem a praktickou realizací jednoho elementu anténní řady v pásmu ISM (Industrial, Scientific and Medical (ISM) radio bands) 5,8 GHz. Cílem je ověřit vlivy lidské tkáně v blízkosti antény. K analýze byla vybrána Vivaldi anténa, která je polarizována rovnoběžně s tkání. Pro Off-Body komunikaci byla vybrána flíčková anténa, která vyzařuje kolmo na lidskou tkáň. Dalším postupem byl návrh samostatné napájecí sítě. Záměrem bylo zkonstruovat síť, jejímž úkolem bylo co nejvíce snížit postranní laloky anténní řady a udělat řadu směrovou. Vlastnosti simulované výsledné anténní řady sou srovnány s vlastnostmi jednoho elementu, který byl analyzován a poté experimentálně ověřen ve volném prostoru a následně i na lidské tkáni. Na základě naměřených vyzařovacích charakteristik jednoho elementu proběhla analýza anténní řady navrženém programu v prostředí MATLAB.

1 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE

1.1 Záření elementárních zdrojů

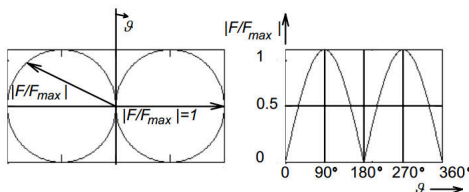
V úvodu kapitoly je popsána základní terminologie. Nejčastěji používaný termín je samotné záření antény. Pro vysvětlení daných pojmů vezmeme v úvahu elementární dipól.

U dipólu rozlišujeme dvě oblasti záření: **Blízká oblast**, jejíž hranice se nachází ve 2 % vlnové délky od dipólu a druhá oblast je tzv. **oblast záření**, jejíž hranice je kladena do vzdálenosti několika vlnových délek od dipólu. [2] Do okolí antény vyzařuje elektromagnetickou vlnu skládající se z intenzity elektrického a magnetického pole. Uvedená pole jsou vždy k sobě kolmá a kolmá na směr šíření (obr. 1.1).



Obr. 1.1: Intenzita pole dipólu

Práce používá **normované vyzařovací charakteristiky**, které jsou grafickým vyjádřením **funkce záření antény**. Vynáší se buď v polárních nebo v kartézských souřadnicích (obr. 1.2).

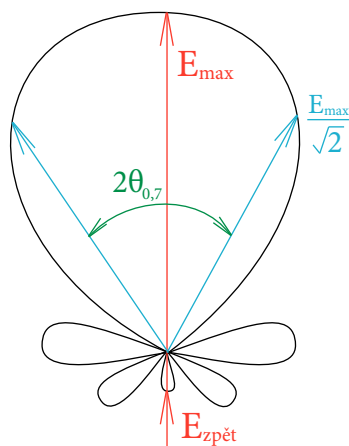


Obr. 1.2: Normovaná vyzařovací charakteristika intenzity \mathbf{E} dipólu [2]

1.2 Parametry antény

Základním parametrem je **polarizace antény**. Popisuje orientaci vektoru elektrické intenzity, kterou anténa vyzařuje. Uvedený dipól (obr. 1.1) je polarizován ve směru osy z , neboť směr vektoru \mathbf{E} je rovnoběžný se směrem osy z .

Z odvozené vyzařovací charakteristiky je určena **úhlová šířka hlavního laloku** (obr. 1.3), která odpovídá šířce laloku s poklesem o 3dB vůči maximu. **Činitelem zpětného záření** je relativní intenzita záření ve směru opačném vůči směru maxima. **Úroveň bočních laloků** určuje relativní velikost prvního, případně dalších bočních laloků vůči hlavnímu. [2]



Obr. 1.3: Vymezení hlavního laloku [2]

Důležitým parametrem záření antény je činitel směrovosti D , který popisuje její směr a výkon vyzařování. Přibližným odhadem lze stanovit dle vztahu:

$$D = \frac{35000}{2\theta_E 2\theta_H} \quad (1.1)$$

Absolutní zisk antény je decibelové vyjádření maximální hodnoty činitele směrovosti:

$$G_{abs} = 10 \cdot \log_{10}(D_{max}) \quad (1.2)$$

Při práci se směrovými charakteristikami je zapotřebí definovat *izotropní zářič*. **Izotropní zářič** vyzařuje do všech směrů shodnou intenzitu elektrického pole. Jedná se o všesměrový ideální zářič, který se využívá při srovnání záření reálné antény. Zisk antény se udává v jednotkách dB_i , což je zisk vztažený k izotropnímu zářiči. Udává rozdíl vyzařování izotropního zářiče od reálné antény.

Při výpočtu **účinnosti vyzařování** uvažujeme bezeztrátovou anténu (ztrátový odpor je nulový). Pak je účinnost vyzařování dána poměrem *činného výkonu* vyzařovaného anténou (získá se integrací Poyntingova vektoru ve vzdálené oblasti přes celý poloprostor) a *činného výkonu* na napájecí svorce zářiče (antény). [3]

1.3 Body Area Network

BAN specifikuje vzájemnou komunikaci antén v rámci lidského těla. Tato komunikace může být realizována podél lidské tkáně (On-Body), od tkáně do prostoru (Off-Body) a nebo dovnitř lidské tkáně (In-Body). Popsaná zařízení mohou být implementována do těla, oblečení nebo nositelných doplňků a mohou mít libovolnou pozici. Větší rozbor o lidské tkáni bude pojednán v 5. kapitole.

2 ANTÉNNÍ LINEÁRNÍ ŘADA

2.1 Účel anténní lineární řady

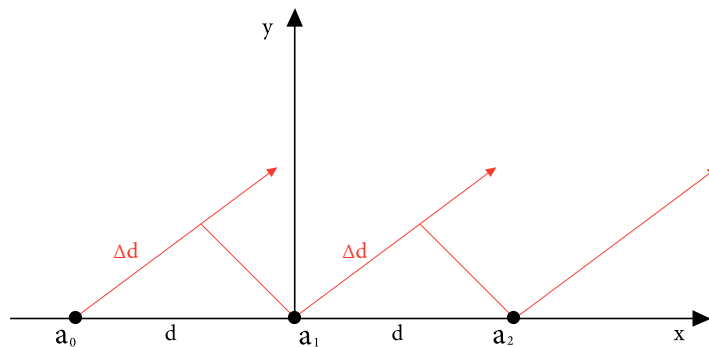
Pokud je v bezdrátových aplikacích požadována velká směrovost vyzařovací charakteristiky, jsou anténní řady vhodným řešením. Anténní řada navíc umožňuje měnit směr hlavního laloku vyzařovací charakteristiky. Používá se i pro zlepšení výkonové bilance rádiového spoje. V praxi bývá nezbytně nutné snižovat nežádoucí zkreslení vlivem vícecestného šíření signálu. Pokud bude použita reálná anténa na substrátu o určité permitivitě ε a konečné zemní plochy, intenzita elektrického pole bude v různých směrech odlišná. Tvar směrové charakteristiky je dán transformací rozložení amplitudy a fáze elektrického pole tvořeného anténní řadou do vzdálené oblasti. Vhodné rozmístění jednotlivých anténních elementů a jejich budící amplitudy s fází, mohou cíleně ovlivňovat tvar vyzařovací charakteristiky.

Následující kapitola řeší analytický popis budícího vektoru a k tomu spojené vztahy. Odpovídající vyzařovací diagramy budou znázorněné v programu MATLAB.

2.2 Analytický popis anténní řady

Pro popis rozmístění budících elementů je uvažováno *řadové* umístění elementů, tj. fázové středy prvků leží na přímce. Jedná se o soustavu *ekvidistantní*, tj. mají stejné vzdálenosti mezi sousedními elementy. [4] Pro vysvětlení postačí tři bodové zářiče umístěné ve směru x (obr. 2.1). Každý příspěvek zářiče je dán amplitudou a_n a fází Ψ_n . Tento vektor je označen \mathbf{A} (Budící vektor) [5]:

$$\mathbf{A} = a_0 \cdot e^{j\Psi_0} + a_1 \cdot e^{j\Psi_1} + a_2 \cdot e^{j\Psi_2} \quad (2.1)$$

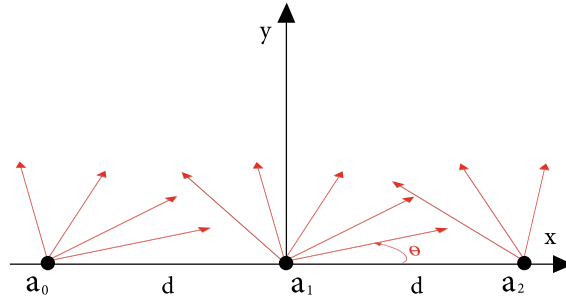


Obr. 2.1: Umístění třech bodových zářičů [5]

Amplitudy jsou normalizovány s ohledem k centrálnímu prvku ($e^{j0} = a_1$). Vzdálenost je počítána od středu souřadné soustavy vůči jednotlivým zářičům. [4] Je značeno Δd . Pokud každý zářič má svou velikost, fázi a vzdálenost, můžeme je sečíst a vzniká AF (Řadový faktor), tzn. skupinová funkce záření, která vyjadřuje princip násobení charakteristik:

$$\mathbf{AF}(\varphi, \theta) = \mathbf{A} \cdot e^{j \cdot k \cdot \Delta d} = \Sigma(a_n \cdot e^{j \Psi_n}) \cdot e^{j \cdot k \cdot \Delta d}, \quad (2.2)$$

kde k je vlnové číslo. Tento budící vektor sestaví a vyčíslí skupinovou funkci záření pro úhly θ od 0° do 180° .

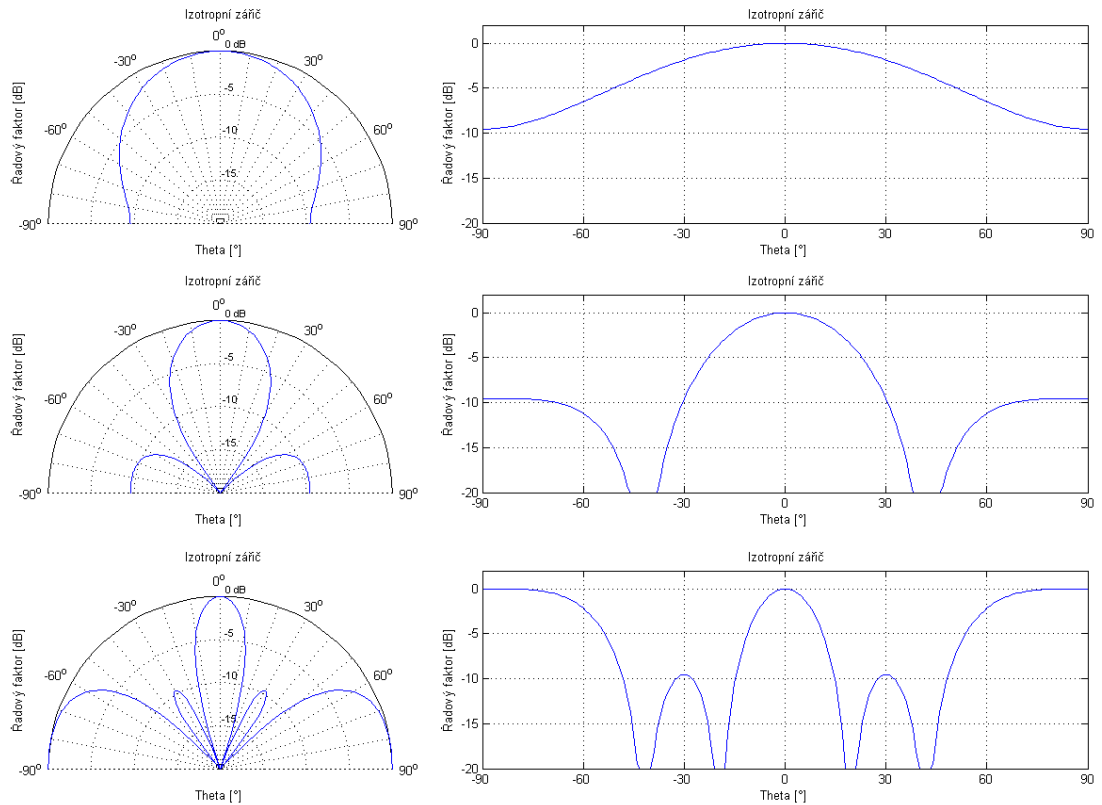


Obr. 2.2: Výpočet záření pro úhly θ od 0° do 180° .

\mathbf{AF} popisuje intenzitu záření antény. Zatím bylo použito teoretické odvození a již zbývá vypočítat funkci záření reálné antény. Funkce reálné antény \mathbf{F} je vynásobena faktorem \mathbf{AF} , čímž bylo dosaženo vztahu 2.3. [5]

$$\mathbf{F}(\mathbf{k})_{\text{sum}} = \mathbf{AF}(\mathbf{k}) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{k}). \quad (2.3)$$

Popsané vztahy byly implementovány do skriptu (obr. A.1) v programu MATLAB. Pro přehledné znázornění syntézy řady byly vykresleny vyzařovací charakteristiky izotropního zářiče pro tři antény v závislosti na vzdálenosti jednotlivých elementů (obr. 2.3).

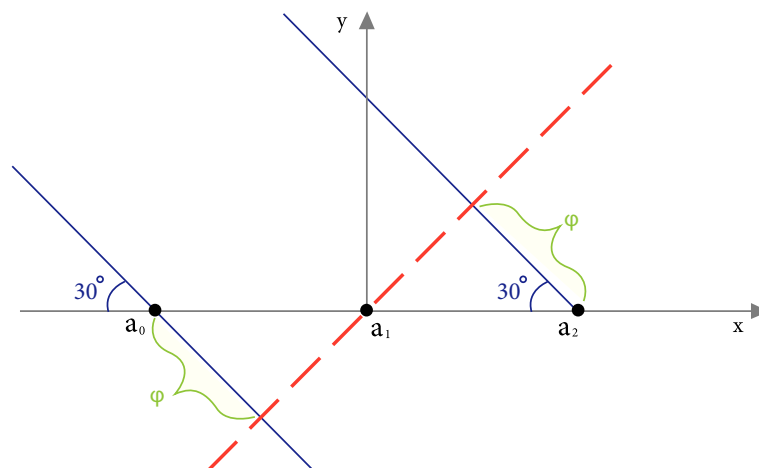


Obr. 2.3: Vyzařovací charakteristiky izotropního zářiče: a) $d = 0,25\lambda$ b) $d = 0,5\lambda$ c) $d = \lambda$

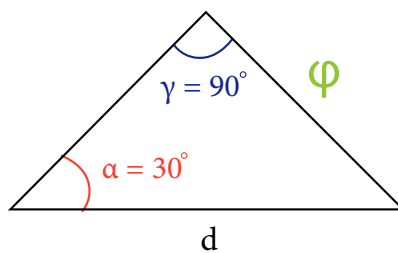
2.3 Budící vektor

V této části práce je věnován prostor fázování anténní řady. Rozlišujeme různé způsoby fázování. Např. *synfázní* (soufázové), tj. fáze proudů jsou stejné ve všech prvcích řady. Analogicky je definována soustava *protifázová*, kde fáze proudů v sousedních prvcích se liší o π . [2] Pro složitější účely je třeba řadu budit zcela podle jiných postupů.

Nejprve je zvolen směr vyzařování anténní řady (obr.2.4), např. do 30° . Na anténní svazek je pohlíženo ze vzdálené oblasti, kde dráhy vln od všech elementů antény jsou rovnoběžné a je možné vést kolmici ke směru šíření vlny (obr.2.4 - červená linka), značící vlnoplochu. Vlnoplocha je místo, kde se vlna šíří se stejnou fází. Přesné vychýlení odpovídá fázové vzdálenosti (obr.2.4 - zelená křivka). Detail z popsané situace (obr. 2.4) poukazuje na goniometrické vzorce pro odvození vzdálenosti φ (obr. 2.5).



Obr. 2.4: Směr vyzařování



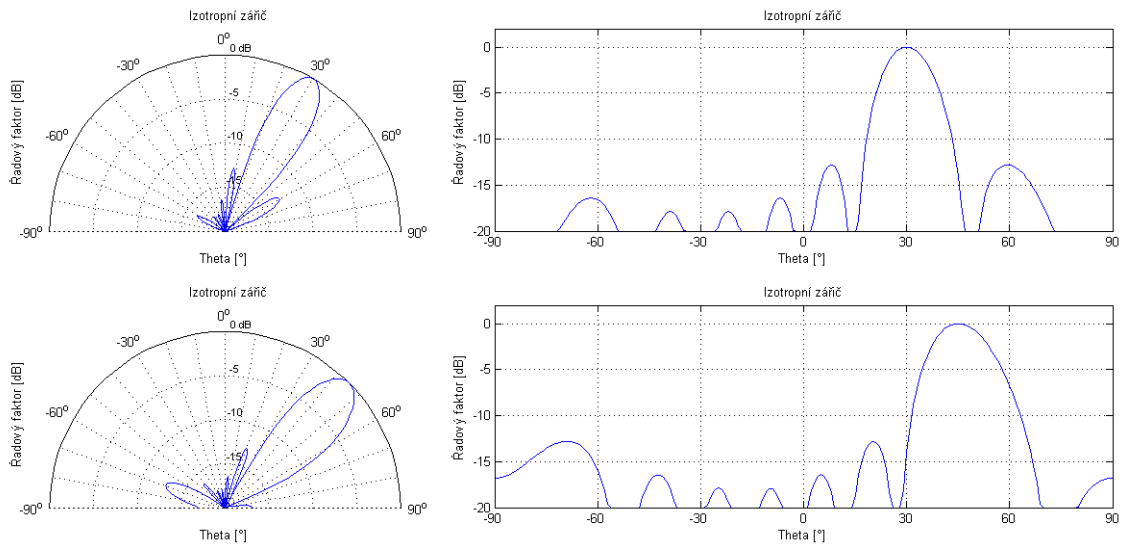
Obr. 2.5: Fázová vzdálenost

$$\varphi = \frac{d \cdot \sin(\alpha)}{\sin(90^\circ)} = d \cdot \sin(\alpha) = d_x \cdot \lambda \cdot \sin(\alpha) \quad (2.4)$$

Nyní zbývá délku φ vyjádřit s fázovým posuvem vlny. Posun je označen vlnovým číslem k . Po vynásobení je získána fáze Ψ budícího vektoru $\mathbf{A}(\Psi)$:

$$\Psi = k \cdot \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_x \cdot \lambda \cdot \sin(\alpha) = 2\pi \cdot d_x \cdot \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

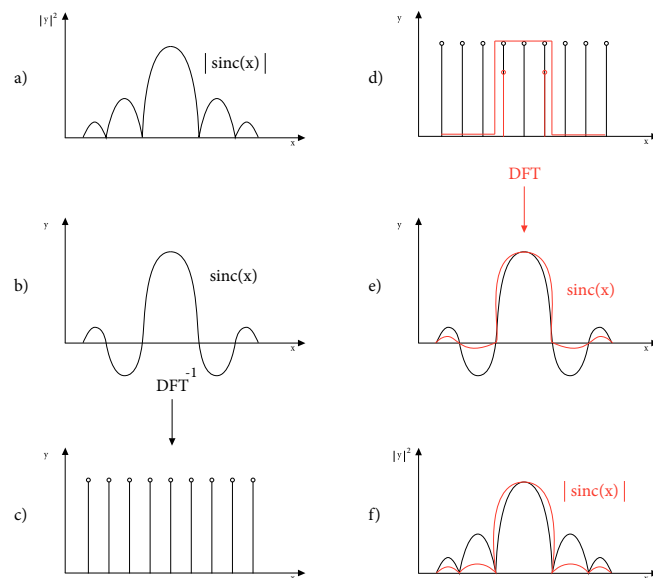
Postupy a vzorce byly implementovány do skriptu (obr. A.1). Pro přehledné zobrazení vychýlení svazku anténní řady byl zvolen svazek obsahující osm elementů v závislosti na úhlu vychýlení (obr. 2.6).



Obr. 2.6: Řada s vychýlením hlavního svazku do specifického úhlu: a) 30° b) 45°

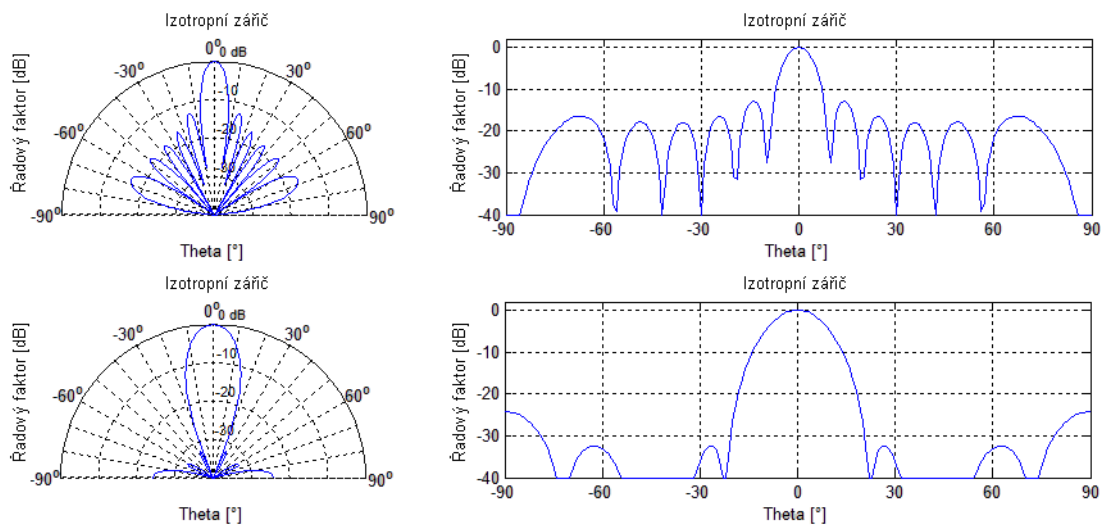
2.4 Redukce postranních laloků

Potlačení bočních laloků lze provést více způsoby. Jednou z metod je použití filtru tzv. Hannova okna (obr. 2.7). Pro vysvětlení dané problematiky je tento postup nejvhodnější.



Obr. 2.7: Schéma redukce vzorků pomocí Hannova okna

Vyzařovací charakteristika anténní řady bude uvažována jako funkce $\text{sinc}(x)$ v absolutní hodnotě (obr. 2.7 - a). Po zpětné DFT (Diskrétní Fourierova transformace) jsou získány vzorky amplitud anténní řady. Smysl uvedené metody spočívá v tom, že vedlejší amplitudy jsou sníženy symetricky z obou stran tak, aby prostřední velikost amplitudy byla největší. Postranní vzorky jsou nulovány. Pomocí DFT vzniká redukována funkce $\text{sinc}(x)$ (obr. 2.7 - f). Zkrácení amplitud výborně potlačí postranní laloky bohužel, za cenu větší šířky hlavního laloku. Praktická ukázka (obr. 2.8) ukazuje zvětšení šířky hlavního laloku při snížení postranních laloků. Pouhé zkrácení amplitudy nestačí, je zapotřebí pracovat s vícero parametry.



Obr. 2.8: Hannova redukce postranního laloku: a) Bez použití Hannova okna, $\Delta\phi_{3dB} = 10^\circ$ b) S použitím Hannova okna, $\Delta\phi_{3dB} = 16^\circ$

Druhý způsob redukce užívá určité algoritmy (aproximace), které mění vícero parametrů pro zanechání úzkého hlavního laloku s přesným potlačením nežádoucích laloků. Mezi známé aproximace patří například Taylorova řada, Binomické pole či Dolph-Chebyshev polynomy. Pro velkou účinnost potlačení postranních laloků byla zvolena Dolph-Chebyshev metoda.

Rozdíl úrovně prvního největšího bočního laloku vůči hlavnímu laloku je definován parametrem SL (Sidelobes) v jednotkách dB. Jedná se o vstupní parametr.

$$SL[dB] = 20 \cdot \log_{10}(R_a) \quad (2.6)$$

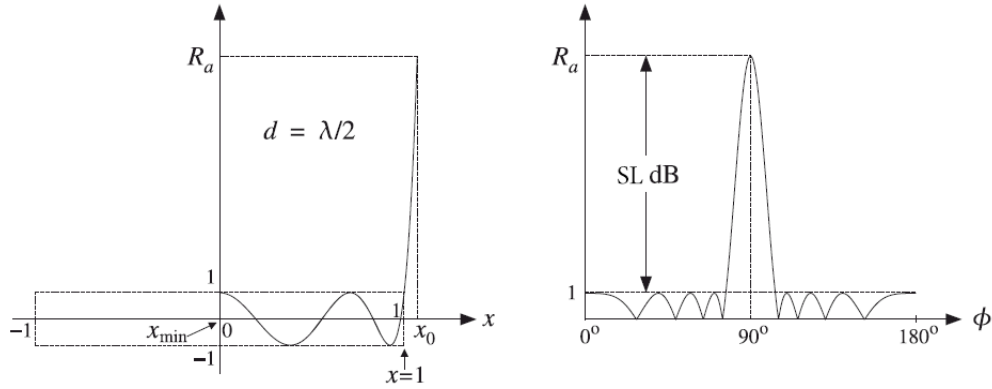
Níže uvedené vzorce a vztahy, které popisují Dolph-Chebyshev metodu, byly čerpány od autora Sophocles J. Orfanidis [6].

Dolph-Chebyshev metoda je analogií Hannova okna se záměrem udržet úzký hlavní lalok a zároveň snížit postranní zvlnění. Bohužel jde o kompromis, neboť vždy nastane zvýšení šířky hlavního laloku. U Dolph-Chebyshev potupu je hledána hranice, kdy vstupní parametr SL nezpůsobí velké zvětšení šířky hlavního laloku.

$$x_0 = \cosh \left[\frac{\operatorname{acosh}(R_a)}{N-1} \right] \quad (2.7)$$

$$x_i = \cos \left[\frac{(i-0,5) \cdot \pi}{N-1} \right] \quad (2.8)$$

Vzorce udávají N počet antén v řadě. R_a Je odlogaritmovaný parametr SL a i nese hodnotu $N-1$. Tyto podmínky (2.7, 2.8) byly získány Z-transformací a zaručí aproximaci, přičemž postranní laloky nepřesáhnou hodnotu SL (obr. 2.9).

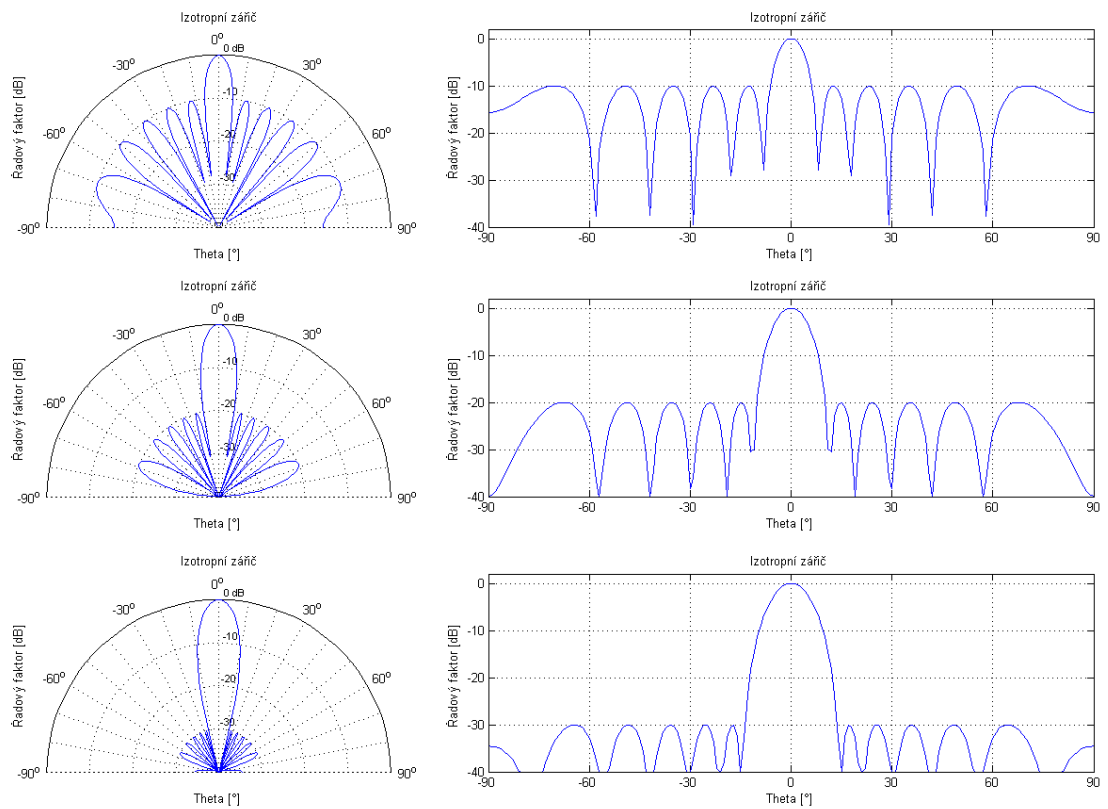


Obr. 2.9: Dolph-Chebyshev metoda [6]

$$\Psi_i = 2 \cdot \operatorname{acosh} \left[\frac{x_i}{x_0} \right] \quad (2.9)$$

$$z_i = e^{j \cdot \Psi_i}, i = 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

Ze získané funkce (obr. 2.9) jsou parametry x_0 a x_i dosazené do argumentu anténní řady Ψ_i a převedené zpětnou Z-transformací na vzorky. Pomocí uvedených vztahů byl ve skriptu vytvořen vstupní parametr SL a funkce pro potlačení postranních laloků (obr. A.1). Správná funkce je otestována pro anténní řadu v závislosti na odstupu bočního laloku vůči hlavnímu (obr. 2.10).



Obr. 2.10: Dolph-Chebyshev redukce: a) $SL = 10$ dB, $\Delta\phi_{3dB} = 10^\circ$ b) $SL = 20$ dB, $\Delta\phi_{3dB} = 12,2^\circ$ c) $SL = 30$ dB, $\Delta\phi_{3dB} = 14,4^\circ$

3 NÁVRHY A SIMULACE ANTÉN V CST

3.1 Volba antény

Vytvořený skript v prostředí MATLAB poslouží jako doplněk pro výpočet anténní řady. Zbývá získat data reálné vyzařovací charakteristiky. K vytvoření pomůže simulátor elektromagnetického pole CST. V simulátoru bude vyšetřen pouze jeden element řady a následně pomocí skriptu bude dopočítána anténní řada.

Aby mohla být anténa umístěna na těle, musí mít malé příčné rozměry a vzávislosti na použité komunikaci na lidském těle musí mít vyzařování všesměrové v případě Off-Body a směrové v případě On-Body komunikaci.

Směr záření Vivaldi antény je očekáván dominantně rovnoběžně s povrchem těla. Anténu lze navrhnout tak, že její vyzařovací diagram má malou směrovost a potom lze směr vyzařování upravit vhodným umístěním reflektoru. Za reflektor můžeme považovat i lidskou tkáň. Vivaldi anténa je obecně širokopásmová a z toho důvodu je nutné se soustředit na návrh napájecí sítě, která nám šířku pásma sníží. Pro Off-Body komunikaci byla zvolena flíčková anténa, protože její vyzařování je kolmé vůči lidské tkáni.

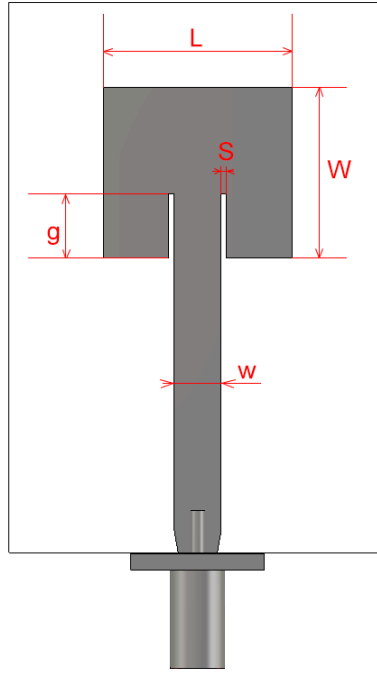
3.2 Flíčková anténa

Způsob napájení antény je zvolen metodou mikropáskového vedení. Anténa bude pracovat v pásmu ISM 5,8 GHz dle zadání této práce. Vybrané dielektrikum *Arlon CuClad 233* ($\epsilon_r = 2,33$) poslouží jako materiál antény s tloušťkou $h = 1,524$ mm. Pomocí parametru s je volena mezera mezi páskem a flíčkem. Zapuštění napájecí části do flíčku je závislé na parametru g . Šířka napájecího pásku w odpovídá 50Ω přizpůsobení (obr. 3.1). Pracovní kmitočet je určen šířkou W . S_{11} (Činitel odrazu na vstupu antény) je roven -34 dB při $f = 5,8$ GHz (obr. 3.2).

Vzorci pro konstrukci flíčkové antény jsou převzaté z [7]. Přizpůsobení (50Ω) na vstupu bylo počítáno kalkulátorem z programu CST.

$$W = \frac{c}{f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = 18mm \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{W}{h} \right]^{-\frac{1}{2}} = 2,3299 \quad (3.2)$$



Obr. 3.1: Model flíčkové antény vytvořený v programu CST

$$\Delta L = h 0,412 \frac{(\varepsilon_{ef} + 0,3)(\frac{W}{h} + 0,264)}{(\varepsilon_{ef} - 0,258)(\frac{W}{h} + 0,8)} = 2,65^{-4} mm \quad (3.3)$$

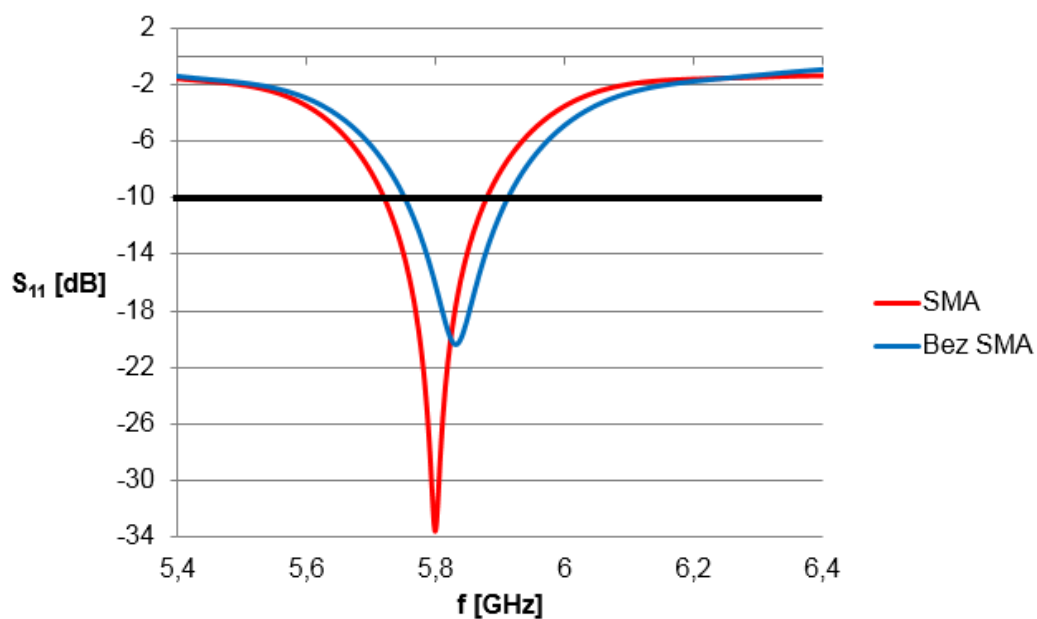
$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_{ef}}} - 2\Delta L = 16,22 mm \quad (3.4)$$

$$w = 4,468 mm \quad (3.5)$$

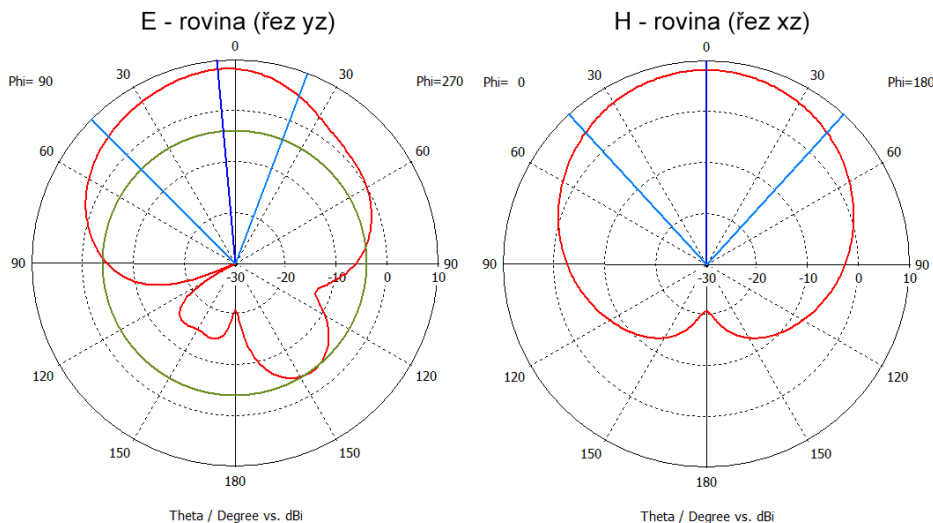
$$s = 0,5 mm \quad (3.6)$$

$$g = 6,1 mm \quad (3.7)$$

Vyzařovací charakteristika flíčkové antény (obr. 3.3) vykazuje v rovině E zadní lalok. Lalok je způsobený delší napájecí částí, ovšem pro účely BAN aplikací bude zadní lalok potlačen lidskou tkání. Délka napájecí části bude u flíčkové anténny řady jiná, neboť rezonanční kmitočet bude třeba doladit na požadovanou úroveň. Z parametrů (tab. 3.1) lze odvodit dokonalé přizpůsobení flíčkové antény při frekvenci 5,8 GHz se ziskem 8,1 dB a s celkovou účinností 96 %. Těmto parametrům odpovídá vyzařování flíčkové antény (obr. 3.4).

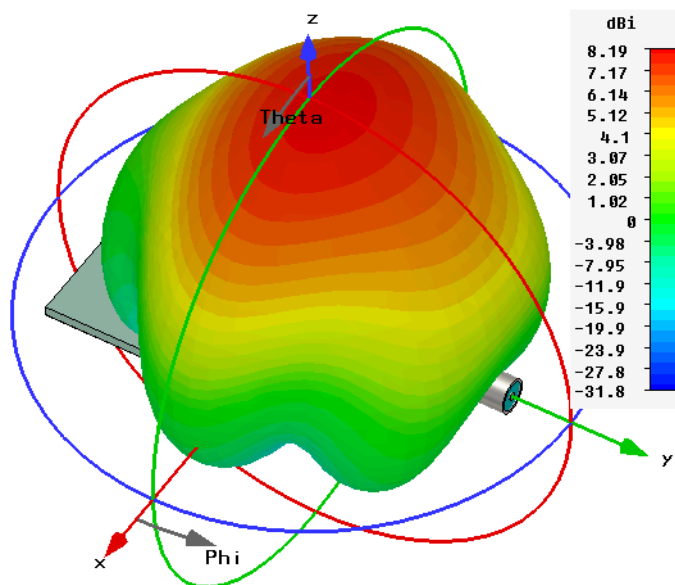


Obr. 3.2: Činitel odrazu na vstupu flíčkové antény



Obr. 3.3: Normované vyzařovací charakteristiky flíčkové antény při frekvenci 5,8 GHz

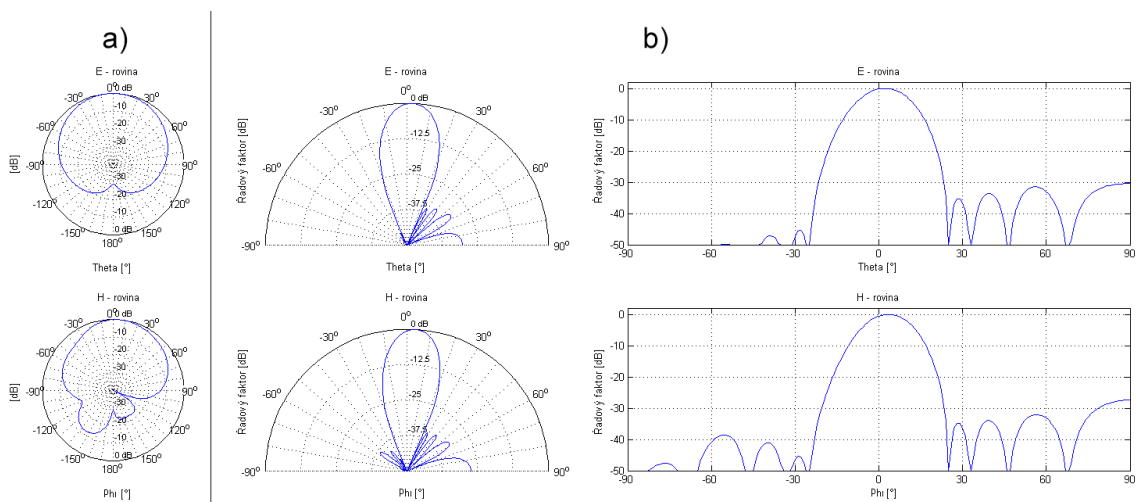
Simulované vyzařovací charakteristiky flíčkové antény z CST jsou zpracovány v programu MATLAB jako anténní řada o osmi elementech (obr. 3.5). Potlačení bočních laloků bylo nastaveno na hodnotu -40 dB, ovšem simulovaná data z CST ukazují potlačení pouze -28 dB. Rozdíl hodnot je dán vzájemnou vazbou mezi elementy v anténní řadě.



Obr. 3.4: Vyzařování flíčkové antény při frekvenci 5,8 GHz

Tab. 3.1: Parametry flíčkové antény při frekvenci 5,8 GHz

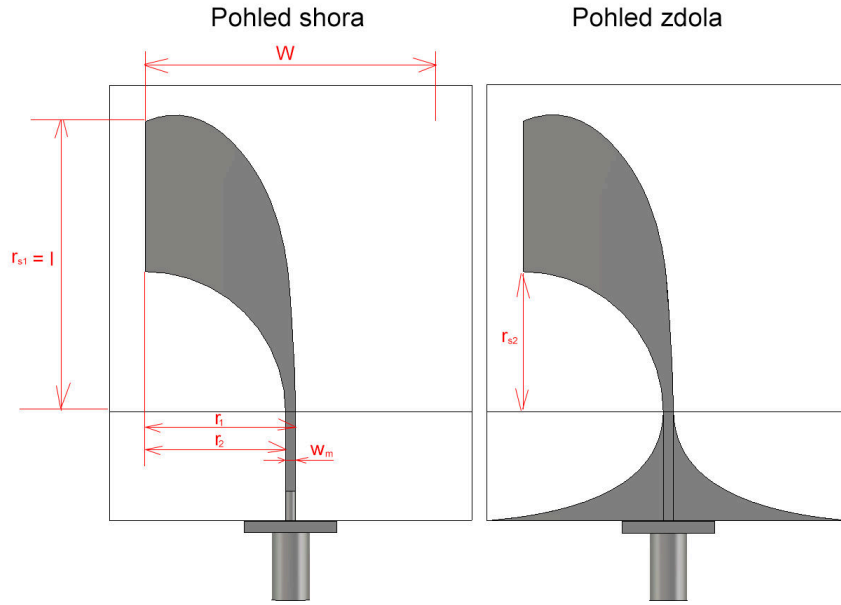
Zisk [dBi]	S_{11} [dB]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]	η_{tot} [%]	PSV [-]
8,1	-34	66	85	6,24	96	1,1



Obr. 3.5: Flíčková anténní řada: a) Načtená data jednoho elementu flíčkové antény z CST b) Řada flíčkových elementů: $n = 8$, $\varphi = 0^\circ$, $SL = -28$ dB

3.3 Vivaldi anténa

Anténa byla navržena tak, aby pracovala v pásmu od 5,2 do 10 GHz s pracovní frekvencí ISM 5,8 GHz (obr. 3.7). Šířka jednoho elementu odpovídá 40,09 mm což je $0,78 \lambda$. Bylo použito dielektrikum *Arlon CuClad 233LX* s tloušťkou $h = 0,508$ mm. Rádus křivky vodivé vrstvy (obr. 3.6) ovlivňuje impedanci antény na jejím vstupu a tím i šířku pásma. Pro napájení Vivaldi antény bylo zvoleno 50Ω mikropáskové vedení o tloušťce w_m rovné 1,4 mm.



Obr. 3.6: Model Vivaldi antény vytvořený v simulátoru CST

Vzorce popisující konstrukci Vivaldi antény jsou převzaty z [8].

$$W = l = \frac{c}{f_l} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = 40,09mm \quad (3.8)$$

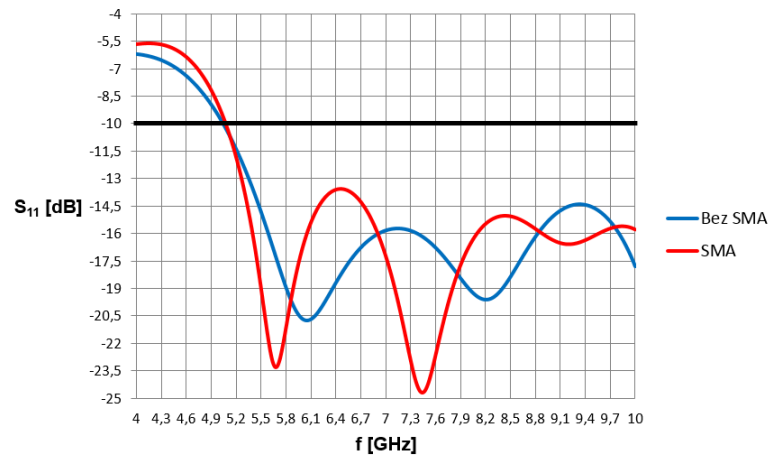
$$w_m = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{h}{Z_0} = 1,4mm \quad (3.9)$$

$$r_1 = \frac{w}{2} + \frac{w_m}{2} = 20,74mm \quad (3.10)$$

$$r_2 = \frac{w}{2} - \frac{w_m}{2} = 19,34mm \quad (3.11)$$

$$r_{s1} = L = 40,09mm \quad (3.12)$$

$$r_{s2} = 0.5r_2 = 9,67mm \quad (3.13)$$

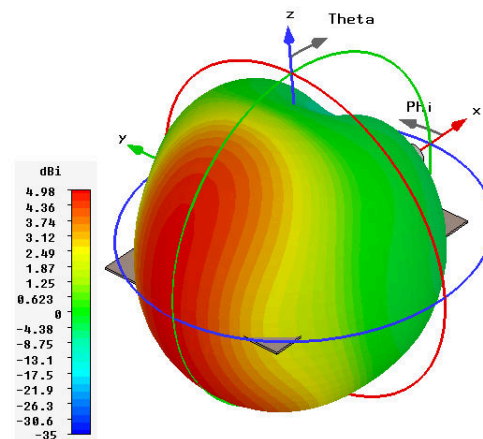


Obr. 3.7: Činitel odrazu na vstupu Vivaldi antény

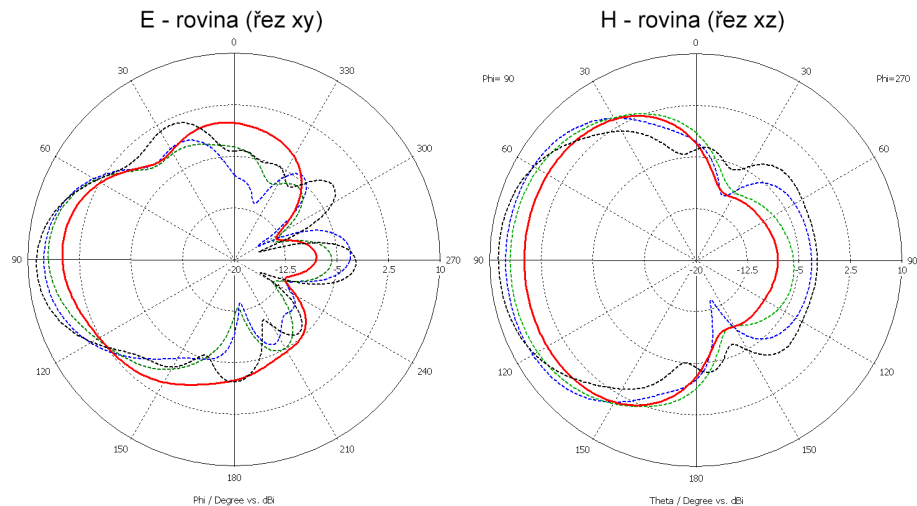
Z parametrů (tab. 3.3) a z vyzařovacích charakteristik (obr. 3.9) lze usoudit, že při větší frekvenci se Vivaldi anténa stává více směrovou anténou. Anténa je polarizována v ose y a směr šíření je v ose $-x$ (obr. 3.8).

Tab. 3.2: Parametry Vivaldi antény v závislosti na frekvenci

f [GHz]	Zisk [dBi]	η_{tot} [%]	PSV [-]	S_{11} [dB]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]
5,8	5,01	97	1,26	-21,2	73	144	3,33
7	7,03	95	1,39	-17,2	51	120	5,72
8	7,51	97	1,25	-16,7	53	112	5,90
10	8,58	96	1,30	-15,9	45	78	10,00

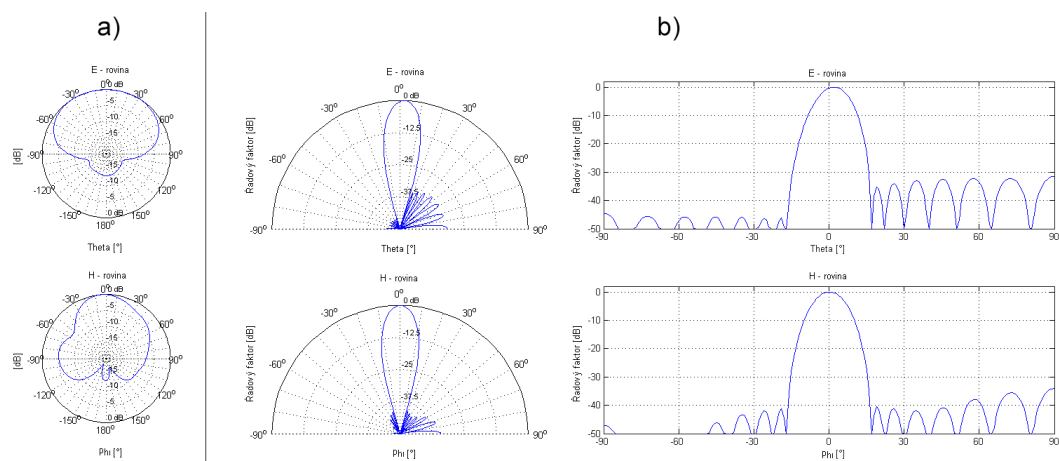


Obr. 3.8: Vyzařování Vivaldi antény při frekvenci 5,8 GHz



Obr. 3.9: Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi antény: Červená 5,8 GHz; Zelená 7 GHz; Modrá 8 GHz; Černá 10 GHz

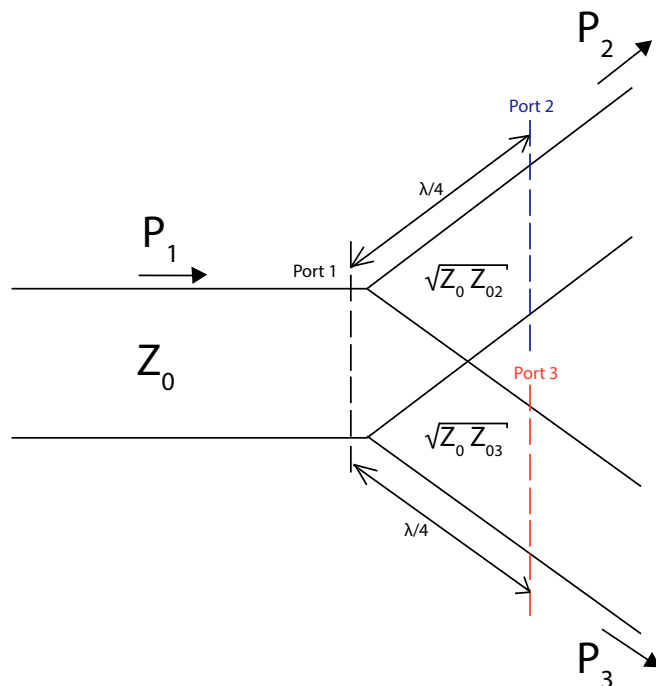
Zadní lalok antény je způsoben větší šířkou pásma, proto anténní řada (obr. 3.10) přispěje k zesílení tohoto laloku. Ovšem pro účely této práce není třeba se tím dále zabývat, protože lidská tkáň směřuje část energie do horního poloprostoru. Zadní lalok se dá redukovat přímým zásahem do vodivé vrstvy na substrátu. Zešíkmením tvaru vodivé vrstvy a změnou rovinné strany (tzv. hřeben) se zadní lalok sníží. Redukci zadního laloku lze najít v publikaci [9]. Anténní řada Vivaldi vykazuje potlačení -31 dB. Opět se uplatňuje vzájemná vazba mezi jednotlivými elementy.



Obr. 3.10: Anténní řada Vivaldi: a) Načtená data jednoho elementu Vivaldi antény z CST b) Řada Vivaldi elementů: $n = 8$, $\varphi = 0^\circ$, $SL = -31$ dB

4 NAPÁJECÍ SÍŤ

Budící vektor z kapitoly 2. poslouží pro návrh napájecí sítě. Dělič typu T je složen z úseku vedení $\frac{\lambda}{4}$, kdy je transformována impedance do požadovaných poměrů. Tím je zaručeno, že do jednotlivých elementů anténní řady je dodán výkon s požadovanou amplitudou. Výsledný dělič zvýší zisk a potlačí boční laloky.



Obr. 4.1: Dělič typu T [10]

Transformace impedance vedení (obr. 4.1), poslouží pro přizpůsobení jednotlivých větví na 50Ω . Výkonový poměr mezi impedancemi je určen vztahem (4.1). Z poměru už lze snadno zjistit impedance dané větve (4.2, 4.3) a pro přizpůsobení $\frac{\lambda}{4}$ jsou použity vzorce (4.4) a (4.5). Vzorce jsou převzaty z [10].

$$\alpha = \frac{P_2}{P_3} = \frac{Z_{03}}{Z_{02}} \quad (4.1)$$

$$Z_{02} = Z_{01} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (4.2)$$

$$Z_{03} = Z_{01} \cdot (1 + \alpha) \quad (4.3)$$

$$Z_{\frac{\lambda}{4}02} = \sqrt{Z_{01} \cdot Z_{02}} \quad (4.4)$$

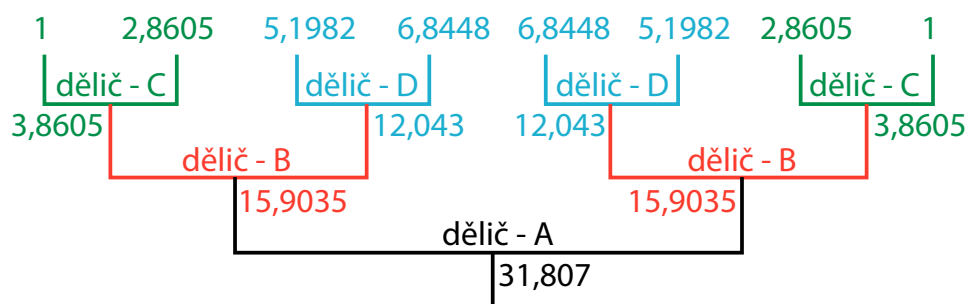
$$Z_{\frac{\lambda}{4}03} = \sqrt{Z_{01} \cdot Z_{03}} \quad (4.5)$$

4.1 Síť pro řadu Vivaldi antén

Prvním krokem bylo nutné získat poměry amplitud mezi elementy. Po načtení simulovaných vyzařovacích charakteristik, např. ze simulátoru elektromagnetického pole CST, skript určil funkci záření a sestavil vektor buzení pro 8 elementů Vivaldi řady. Potlačení bočních laloků bylo nastaveno na hodnotu -40 dB, ovšem simulovaná data z CST ukazují potlačení pouze -25 dB (obr. 3.10).

Výsledkem testovací řady z programu MATLAB je budící vektor obsahující poměry amplitud mezi elementy:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 2,8605 & 5,1982 & 6,8448 & 6,8448 & 5,1982 & 2,8605 & 1 \end{pmatrix}$$



Obr. 4.2: Poměry amplitud jednotlivých děličů

Pro výpočet poměrů jednotlivých děličů (obr. 4.2) se vychází z čísel budícího vektoru. V jednotlivé větvi se čísla sečtou a dají výsledný poměr předcházejícího děliče. Například dělič-C je roven součtu čísel 1 a 2,8605 (výsledek 3,8605). Níže jsou uvedené výpočty impedancí jednotlivých děličů s výslednou sítí (obr. 4.3).

dělič - A:

$$Z_{\frac{\lambda}{4}02} = 50 \cdot \sqrt{2} = 70,71\Omega = Z_{\frac{\lambda}{4}03} \quad (4.6)$$

dělič - B:

$$\alpha_B = \frac{3,8605}{12,043} = 0,3206 \quad (4.7)$$

$$Z_{02} = 50 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,3206}\right) = 205,96\Omega \quad (4.8)$$

$$Z_{\frac{\lambda}{4}02} = \sqrt{50 \cdot 205,96} = 101,48\Omega \quad (4.9)$$

$$Z_{03} = 50 \cdot (1 + 0,3206) = 66,03\Omega \quad (4.10)$$

$$Z_{\frac{\lambda}{4}03} = \sqrt{50 \cdot 66,03} = 57,46\Omega \quad (4.11)$$

dělič - C:

$$\alpha_C = \frac{1}{2,8605} = 0,3496 \quad (4.12)$$

$$Z_{02} = 50 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,3496}\right) = 193,02\Omega \quad (4.13)$$

$$Z_{\frac{\lambda}{4}02} = \sqrt{50 \cdot 193,02} = 98,24\Omega \quad (4.14)$$

$$Z_{03} = 50 \cdot (1 + 0,3496) = 67,48\Omega \quad (4.15)$$

$$Z_{\frac{\lambda}{4}03} = \sqrt{50 \cdot 67,48} = 58,07\Omega \quad (4.16)$$

dělič - D:

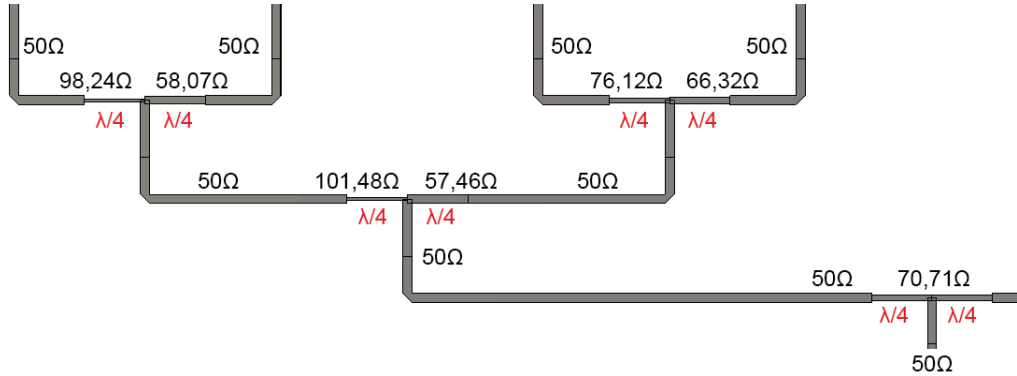
$$\alpha_D = \frac{5,1982}{6,8448} = 0,7594 \quad (4.17)$$

$$Z_{02} = 50 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,7594}\right) = 115,84\Omega \quad (4.18)$$

$$Z_{\frac{\lambda}{4}02} = \sqrt{50 \cdot 115,84} = 76,12\Omega \quad (4.19)$$

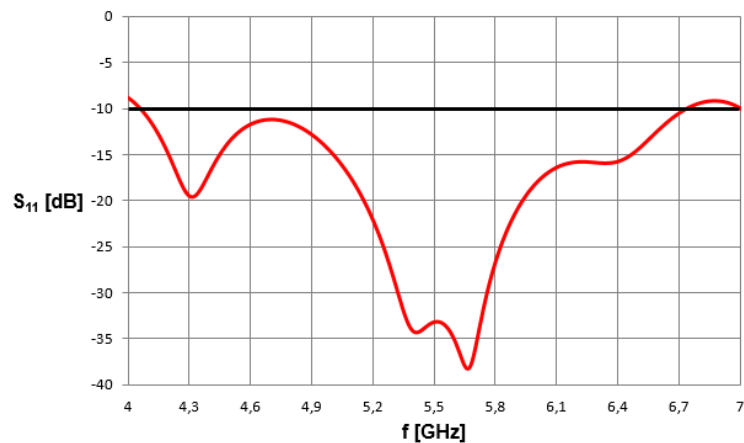
$$Z_{03} = 50 \cdot (1 + 0,7594) = 87,97\Omega \quad (4.20)$$

$$Z_{\frac{\lambda}{4}03} = \sqrt{50 \cdot 87,97} = 66,32\Omega \quad (4.21)$$

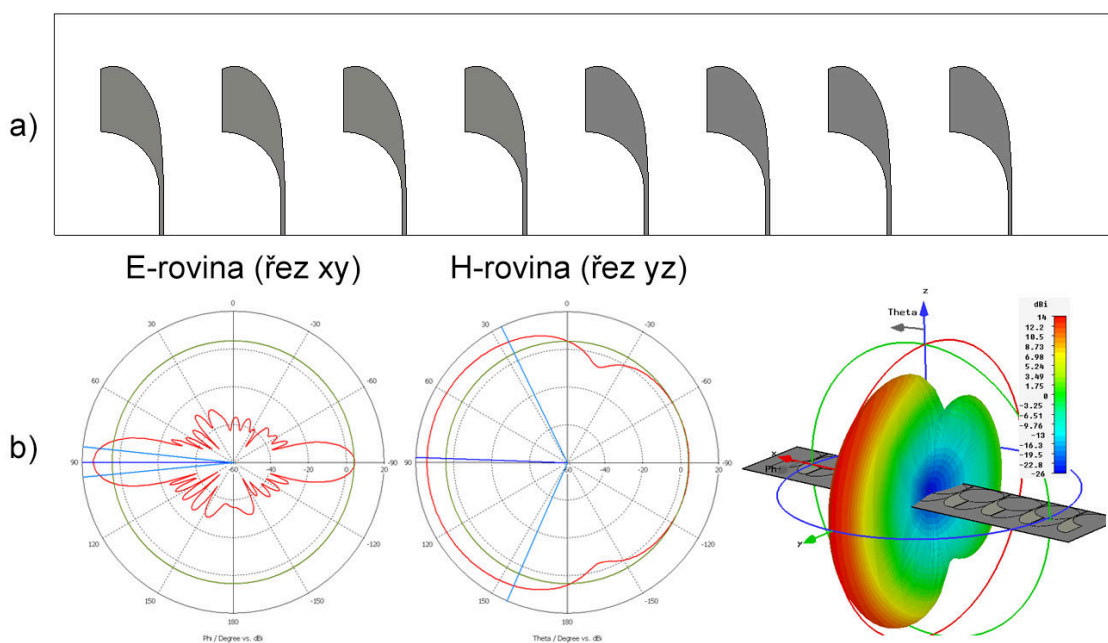


Obr. 4.3: Impedance jednotlivých děličů napájecí sítě pro Vivaldi řadu

Z činitele odrazu (obr. 4.4) lze vidět, jak je napájecí síť úzkopásmová vzhledem k Vivaldi anténě. Menší šířka pásma sítě je způsobena jednotným přizpůsobením na pracovní kmitočet 5,8 GHz. Se změnou kmitočtu se mění i transformační vlastnosti čtvrtvlnných úseků mikropáskového vedení.



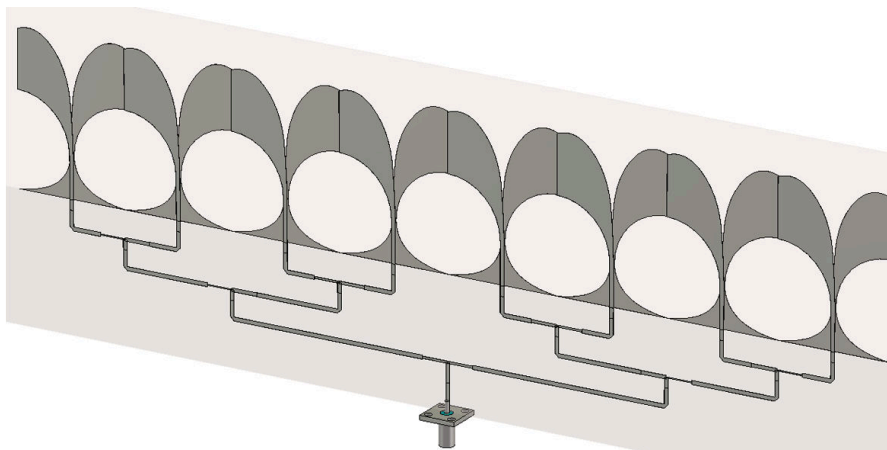
Obr. 4.4: Činitel odrazu na vstupu napájecí sítě pro řadu Vivaldi



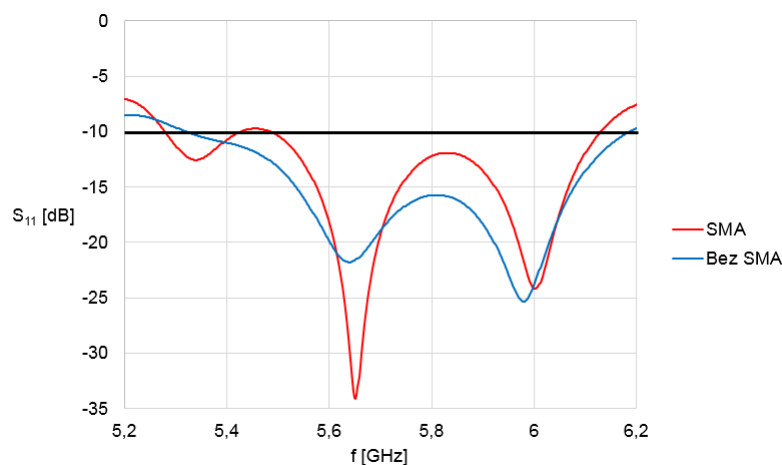
Obr. 4.5: Simulace pro ověření budícího vektoru pro řadu Vivaldi antén: a) Elementy napájeny jednotlivě bez napájecí sítě b) Odpovídající vyzařovací charakteristiky při frekvenci 5,8 GHz

Tab. 4.1: Parametry pro řadu Vivaldi elementů při frekvenci 5,8 GHz

	Zisk [dBi]	SL [dB]	S_{11} [dB]	PSV [-]	η_{tot} [%]	B [MHz]
SMA	14,5	-20,30	-12,22	1,65	90	849,2
Bez SMA	14,5	-20,32	-15,75	1,39	93	863,2



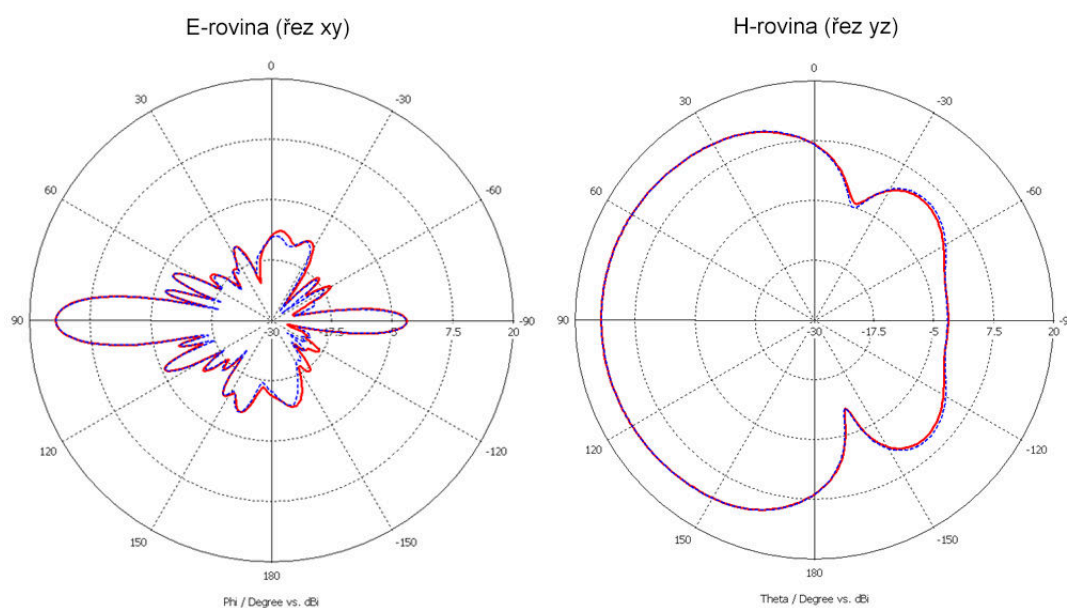
Obr. 4.6: Model anténní řady Vivaldi s pohledem bez substrátu



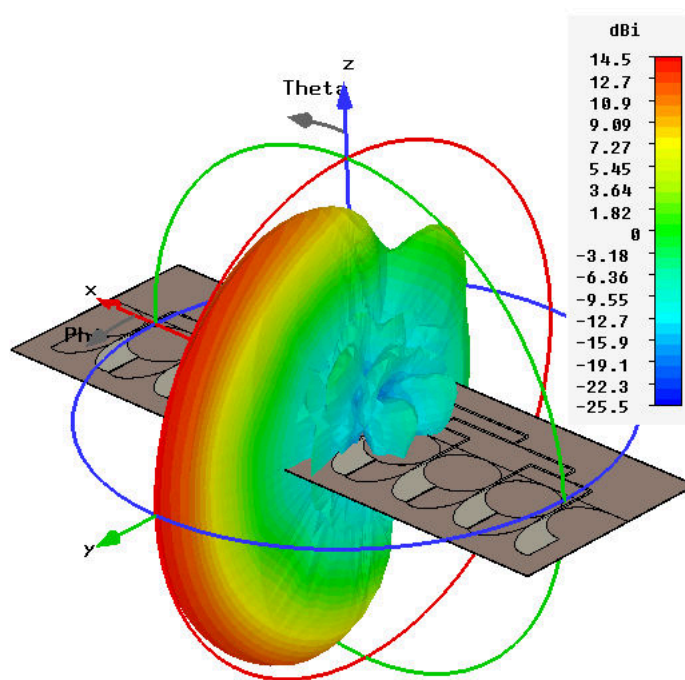
Obr. 4.7: Činitel odrazu na vstupu Vivaldi řady

Pro ověření budícího vektoru, vypočteného programem MATLAB, byla nastavena simulace Vivaldi elementů bez napájecí sítě (obr. 4.5). Každý element byl buzen svým portem a tím nedocházelo ke společné vazbě. Výsledky z CST ukazují potlačení -38,22 dB oproti -40 dB ze skriptu. Tím je dokázána správnost naprogramovaného skriptu.

K vytvořené síti se připojí Vivaldi antény (obr. 4.6) a na činiteli odrazu (obr. 4.7) se projeví vliv úzkopásmové sítě. Z parametrů (tab. 4.1) je odečtena šířka pásma 849,2 MHz. Anténní řada vykazuje směrovost s potlačením -20 dB (obr. 4.8) a ziskem 14,5 dBi (obr. 4.9). Zhoršené potlačení postranních laloků je způsobeno společnou vazbou mezi elementy. Výsledné rozměry anténní řady 35 x 12 cm jsou pro praktické využití nereálné, ovšem pro účely ověření vlastností a funkce anténní řady v blízkosti lidské tkáně můžeme tento fakt zanedbat.



Obr. 4.8: Normované Vyzařovací charakteristiky Vivaldi řady při frekvenci 5,8 GHz: červená SMA, modrá bez SMA

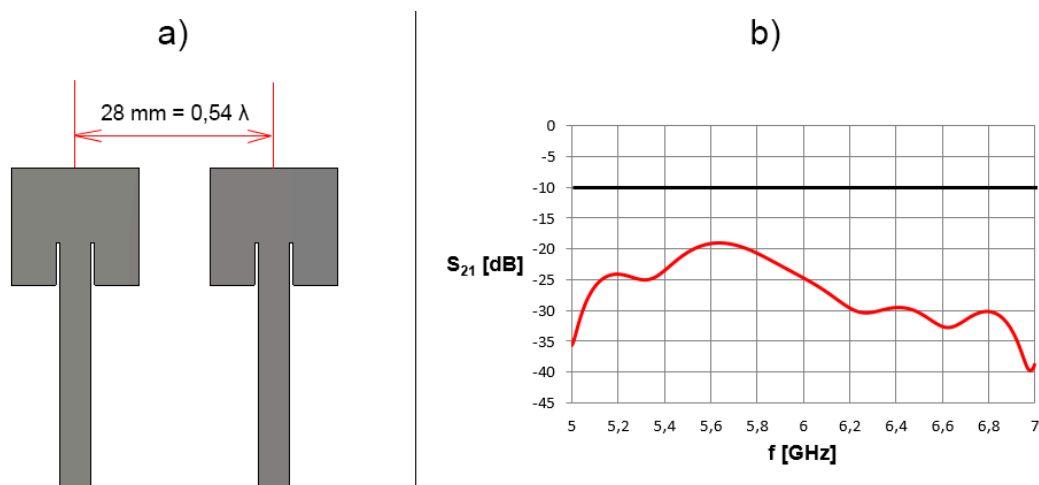


Obr. 4.9: Vyzařování Vivaldi řady při frekvenci 5,8 GHz

4.2 Síť pro řadu flíčkových antén

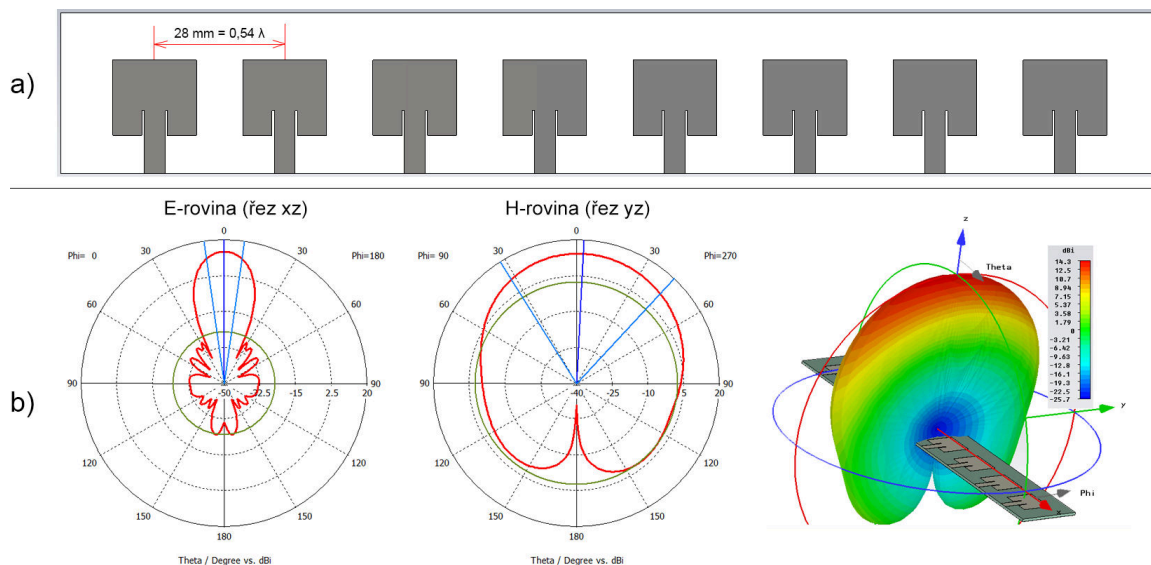
Při analýze anténní řady v programu MATLAB bylo simulováno osm elementů pro potlačení postranních laloků -40 dB. Vstupní parametry pro simulaci jsou stejné jako pro řadu Vivaldi, proto budící vektor je totožný s předchozím vektorem. Pro analýzu byly nahrány reálné charakteristiky flíčkové antény (viz kapitola 3, obr. 3.5). Simulovaná anténní řada vykazuje potlačení pouze -28 dB.

V dalším kroku bylo úkolem stanovit vzdálenost elementů. Vzdálenost byla určena kompromisem mezi vazbou dvou elementů a konečným ziskem celé anténní řady. Při větší vzdálenosti se zvyšuje zisk a řada se stává více směrovou. Velikost sítě rozhoduje o konečné vzdálenosti. Bylo ověřeno, že při kratší vzdálenosti elementů anténní řady, se zvyšuje vzájemná vazba a ta způsobí vyšší boční laloky. Výsledná vzdálenost odpovídá rozměru 28 mm ($0,54\lambda$) s vazbou -20 dB pro frekvenci 5,8 GHz (obr. 4.10). Tato vzdálenost je použitelná pro konstrukci řady, neboť zisk řady 14,3 dBi (obr. 4.11) je dostačující.

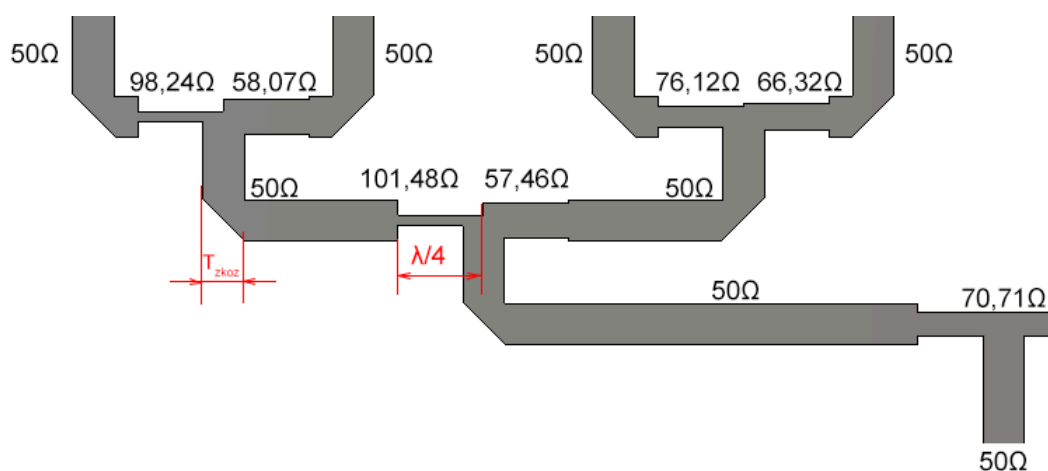


Obr. 4.10: Simulace pro stanovení vzdálenosti jednotlivých elementů: a) Výsledná vzdálenost dvou elementů řady b) Odpovídající přenos při frekvenci 5,8 GHz

Další simulace se zabývá ověřením budícího vektoru z programu MATLAB. Elementy byly buzeny jednotlivě bez žádné napájecí sítě. Obrázek 4.11 b) ukazuje potlačení -39 dB, tím je ověřena správná funkčnost naprogramovaného skriptu. Jelikož budící vektor pro flíčkovou řadu je obdobný pro síť řady Vivaldi, tak i impedance jednotlivých větví jsou totožné. Tloušťka a permitivita použitého substrátu pro flíčkovou anténu definuje odlišnou šířku mikropásky než u sítě pro řadu Vivaldi. Detail výsledné napájecí sítě je na obrázku 4.12, který ukazuje symetrickou polovinu sítě.

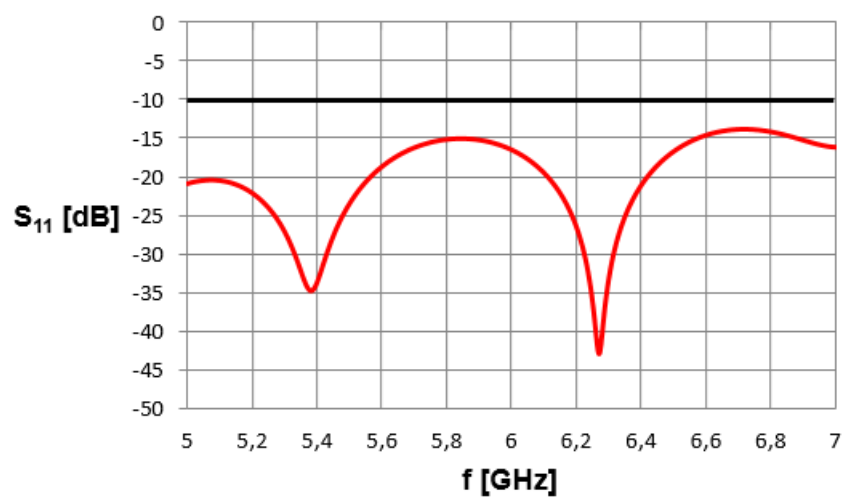


Obr. 4.11: Simulace pro ověření budícího vektoru pro řadu flíčkových antén: a) Elementy napájeny jednotlivě bez napájecí sítě b) Odpovídající vyzařovací charakteristiky při frekvenci 5,8 GHz

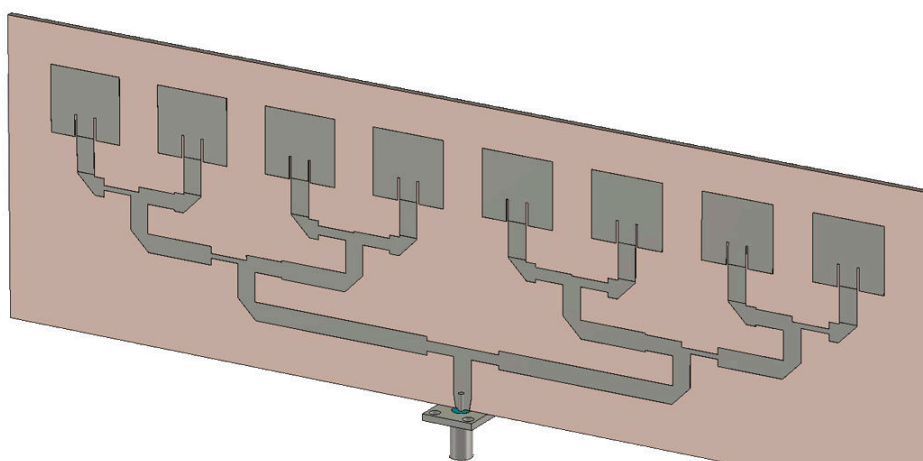


Obr. 4.12: Napájecí síť pro flíčkovou řadu antén

Celková napájecí síť bez flíčkových elementů je přizpůsobená na -15 dB při frekvenci 5,8 GHz (obr. 4.13). Nyní zbývá k napájecí síti připojit navržené flíčkové antény (obr. 4.14). V praxi anténní řada nebude zrealizovaná, poslouží pouze k ověření vyzařování jednoho a osmi elementů v blízkosti lidské tkáně. Řada tedy zůstává jenom v simulacích a proto je uvažována šířka 24 cm a výška 8 cm. Řada potlačuje postranní laloky na hodnotu -14 dB (tab. 4.2)(obr. 4.16). Pro přizpůsobení řady -16,5 dB (obr. 4.15) bylo potřeba změnit délku mikropásku. Zisk anténní řady je roven 15,7 dBi (obr. 4.17).



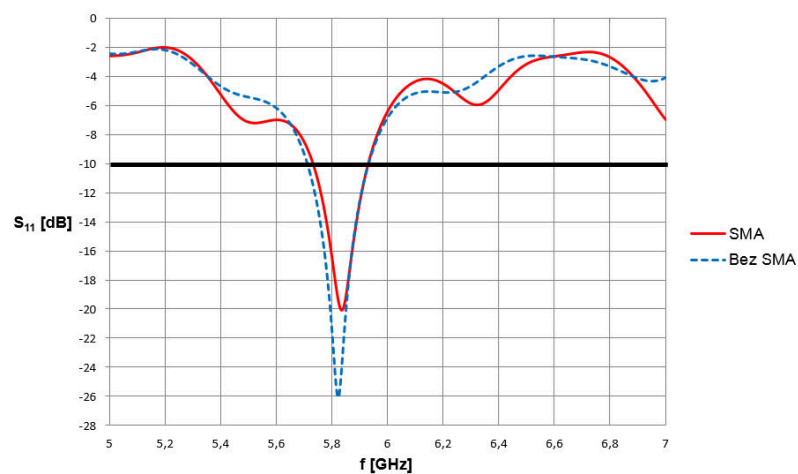
Obr. 4.13: Činitel odrazu na vstupu napájecí sítě bez flíčkových elementů



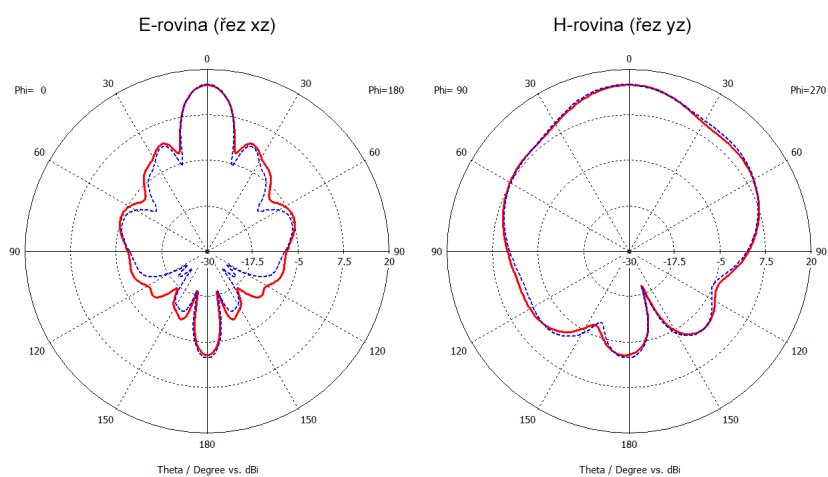
Obr. 4.14: Model flíčkové řady

Tab. 4.2: Parametry pro řadu flíčkových elementů při frekvenci 5,8 GHz

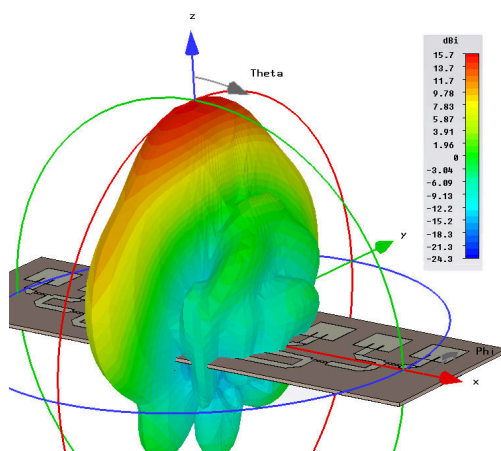
	Zisk [dBi]	SL [dB]	S_{11} [dB]	PSV [-]	η_{tot} [%]
SMA	15,7	-13,7	-16,53	1,35	93
Bez SMA	15,8	-14,5	-21,63	1,18	93



Obr. 4.15: Činitel odrazu na vstupu řady flíčkových elementů



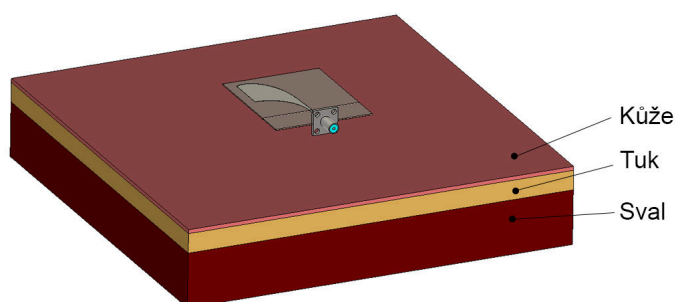
Obr. 4.16: Normované vyzařovací charakteristiky řady flíčkových elementů při frekvenci 5,8 GHz: červená barva- SMA, modrá barva - bez SMA



Obr. 4.17: Vyzařování flíčkové řady při frekvenci 5,8 GHz

5 SIMULACE ANTÉNY V BLÍZKOSTI LIDSKÉ TKÁNĚ

Vlastnosti lidské tkáně jsou získány pro kmitočet 5,8 GHz. [11] Součástí tkáně je kůže, tuk a sval (obr. 5.1). Každá z těchto částí je popsána vodivostí, permitivitou, ztrátovým číslem a hloubkou vniku (tab. 5). Nejvíce ovlivňuje záření antény samotná kůže s vysokou permitivitou 38,6 a vodivostí 4,3 S/m. Na anténu bude působit i sval s permitivitou 48,4 a vodivostí 5 S/m.



Obr. 5.1: Složení lidské tkáně

Tab. 5.1: Vlastnosti lidské tkáně při frekvenci 5,8 GHz [11]

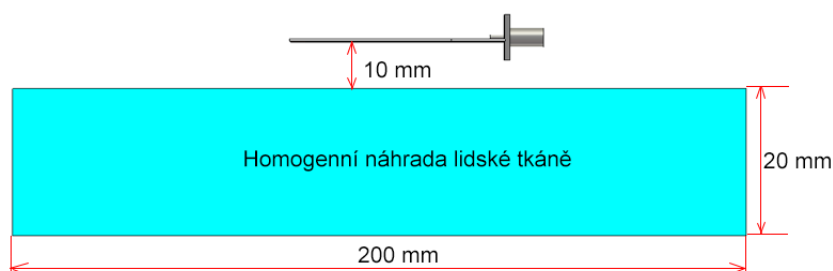
Vlastnosti	Kůže (vlhká)	Tuk	Sval
σ [S/m]	4,342	0,293	4,9615
ϵ_r [-]	38,624	4,9549	48,485
$tg\delta$ [-]	0,3484	0,1834	0,3172
λ [m]	0,008197	0,023125	0,0073
δ [m]	0,0077096	0,040481	0,00754

Tkáň svými vlastnostmi se pro anténu jeví částečně jako reflektor a vyzářenou energii směřuje do horního poloprostoru. Účinek lidské tkáně bude záviset i na polarizaci antény a její zemní ploše. Vivaldi anténa je polarizována rovnoběžně s tkání a tím je nejvíce ovlivněna, kdežto flíčková anténa s polarizací kolmou vůči tkáni a se zemní plochou po celé své ploše, veškerý účinek tkáně utlumí. Pro reálné měření byla vyrobena homogenní náhrada (fantom) na Ústavu radioelektroniky FEKT VUT v Brně. Fantom vykazuje permitivitu 48 a vodivost 8 S/m. Pro dosažení přesných výsledků bude v simulacích uvažována právě tato homogenní náhrada. Pro simulace a praktické měření poslouží fantom s rozměry 200 x 200 x 20 mm.

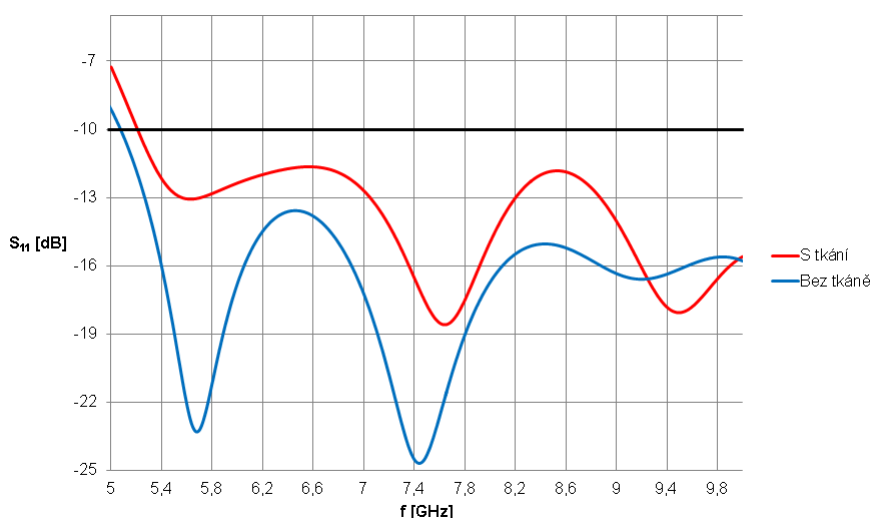
Pro praktické měření bude využit samostatný element anténní řady. Celá řada zůstane pouze v simulacích pro ověření a porovnání vlastností s jednotlivým elementem řady. V praxi se anténa bude vždy nacházet na jakémkoliv oblečení, z tohoto důvodu je v simulacích anténa vzdálena 10 mm od tkáně pomocí polystyrénu.

5.1 Vivaldi anténa v blízkosti fantomu

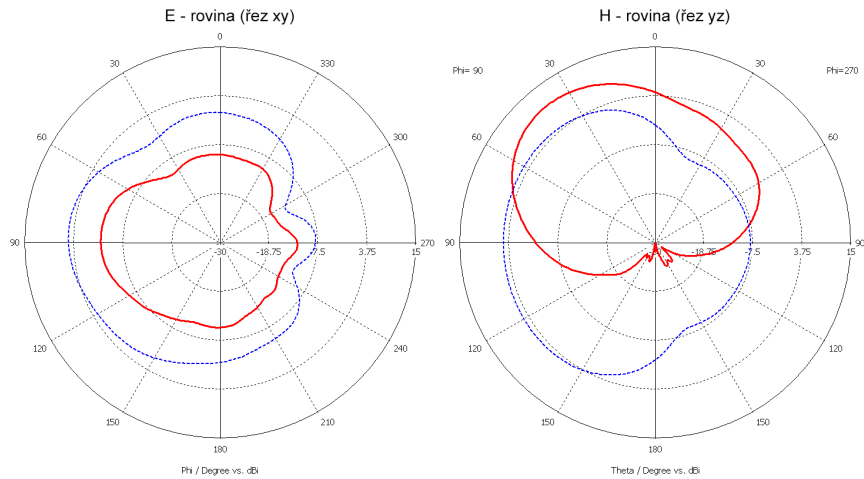
Každá simulace v blízkosti lidské tkáně bude realizována se stejnými parametry. Anténa bude umístěna 10 mm nad tkání a rozměr fantomu bude odpovídat 200 x 200 x 20 mm (obr. 5.2). Simulace jednoho elementu Vivaldi v blízkosti lidské tkáně dokazuje tvrzení, že tkáň vychyluje část vyzářené energie do horního poloprostoru (obr. 5.4, obr. 5.5), přesněji o 40° . Úkolem bude dokázat stejné tvrzení i pro řadu osmi elementů. Lidská tkáň ovlivňuje i přizpůsobení antény. Z činitele odrazu lze vidět zhoršené přizpůsobení (obr. 5.3).



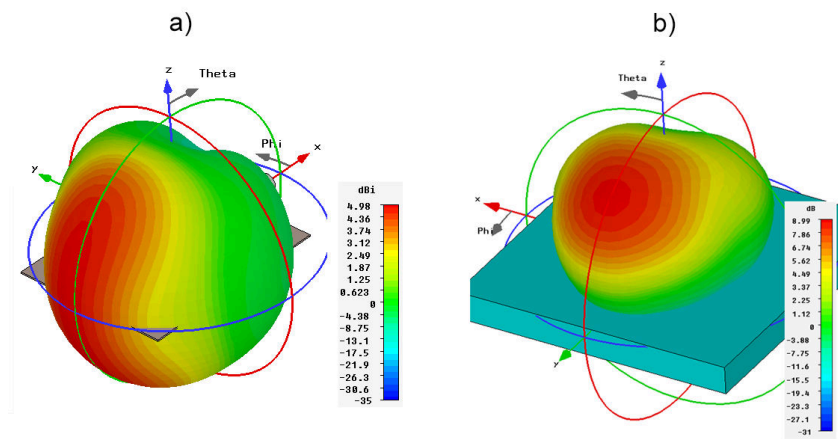
Obr. 5.2: Boční pohled měření antény v blízkosti lidské tkáně



Obr. 5.3: Činitel odrazu na vstupu Vivaldi antény v blízkosti fantomu



Obr. 5.4: Normované vyzářovací charakteristiky Vivaldi antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně



Obr. 5.5: Vyzářování Vivaldi antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: a) bez tkáně b) s tkání

Šířka hlavního laloku vychází pro Vivaldi anténu ve volném prostředí 144° . Při vychýlení hlavního laloku lidskou tkání je šířka rovna 50° ve směru 40° (tab. 5.1). Z parametrů je zřejmé, že lidská tkáň spálí část vyzářené energie, neboť účinnost klesla z 99 % na 79 %.

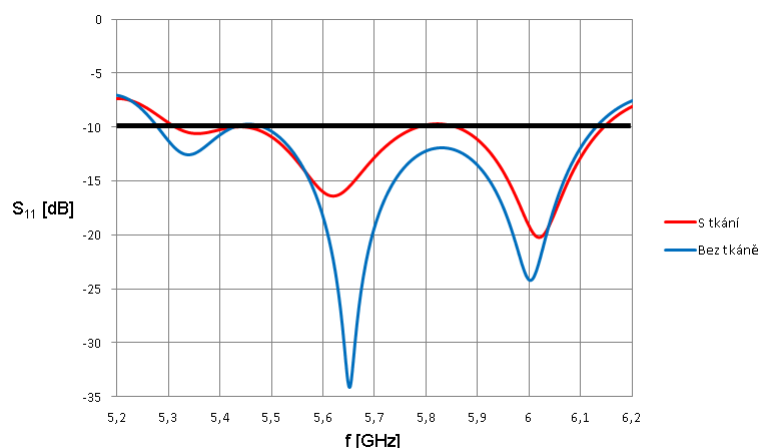
Tab. 5.2: Parametry pro Vivaldi anténu v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz

	Zisk [dBi]	S_{11} [dB]	PSV [-]	η_{tot} [%]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]
S tkání	9	-12,8	1,6	79	58	50	12,07
Bez tkáně	5	-21,2	1,2	99	73	144	3,33

5.2 Anténní řada Vivaldi v blízkosti fantomu

Anténní řada se šířkou 36 cm je pro praktické měření příliš rozměrná. Samotný fantom je široký pouze 20 cm. Pro ověření chování anténní řady v simulaci je nutno použít dva fantomy vedle sebe s celkovou šířkou 40 cm. V praxi bude realizován pouze jeden element anténní řady.

Vyzařovací charakteristika anténní řady Vivaldi (obr. 5.7) vykazuje vychýlení části vyzářené energie do 36° oproti 40° jednotlivého elementu. Rozdíl 4° dokazuje, že lidská tkáň se chová stejně jak pro jednotlivý element řady, tak pro celou anténní řadu. Šířka hlavního laloku anténní řady vychází ve volném prostředí 141° . Při vychýlení hlavního laloku fantomem vychází šířka 48° ve směru 36° (obr. 5.8). Na činiteli odrazu lze vidět zhoršené přizpůsobení (obr. 5.6) způsobené polarizací antény.

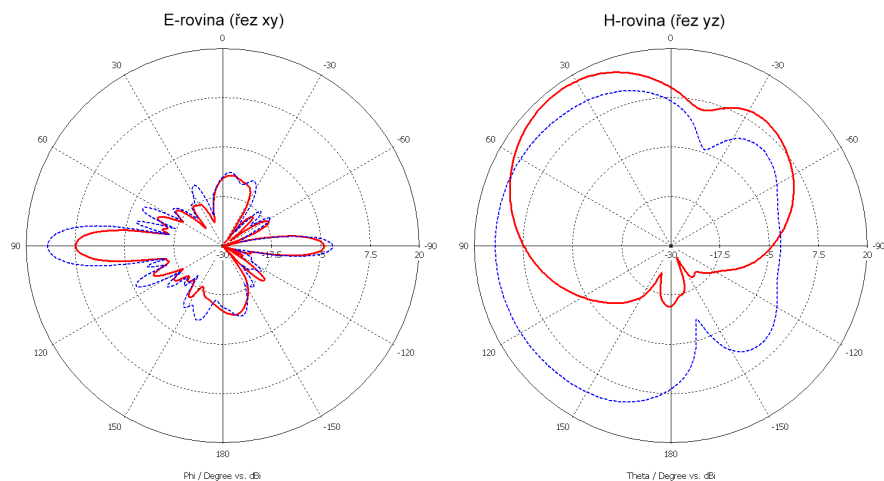


Obr. 5.6: Činitel odrazu na vstupu anténní řady Vivaldi v blízkosti fantomu

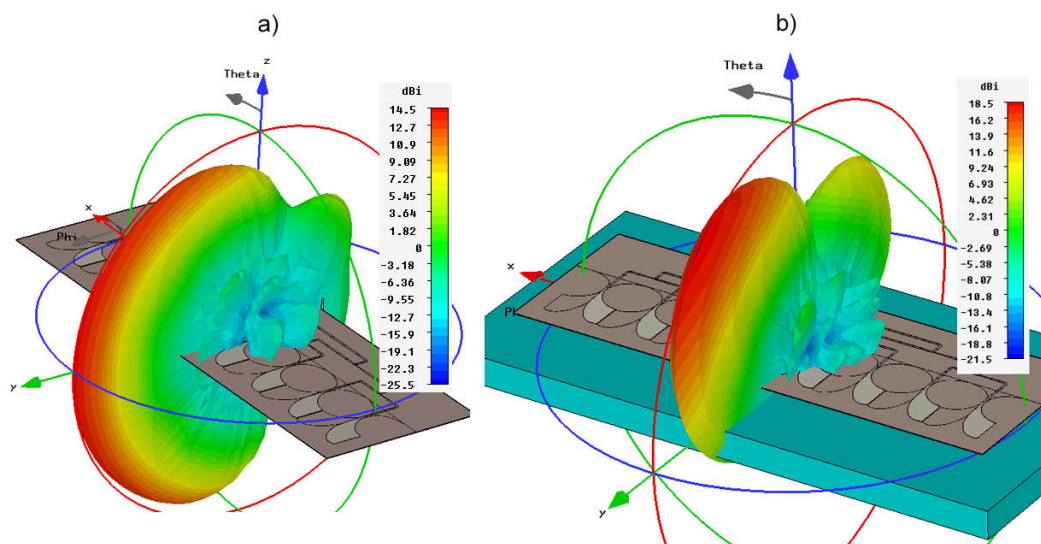
Zemní plocha Vivaldi řady není rozložena po celé své ploše, proto účinnost v blízkosti fantomu klesne na 68 % (tab. 5.2). Na účinnosti se projeví i polarizace samotné Vivaldi antény. Anténa je polarizována rovnoběžně s tkání a velká většina energie je spalována díky lidské tkáni.

Tab. 5.3: Parametry pro řadu Vivaldi elementů v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz

	Zisk [dBi]	SL [dB]	S_{11} [dB]	η_{tot} [%]	B [MHz]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]
S tkání	18,3	-18,4	-9,80	68	831,0	9,5	48	76,8
Bez tkáně	14,5	-20,3	-12,22	90	849,2	9,7	141	25,6



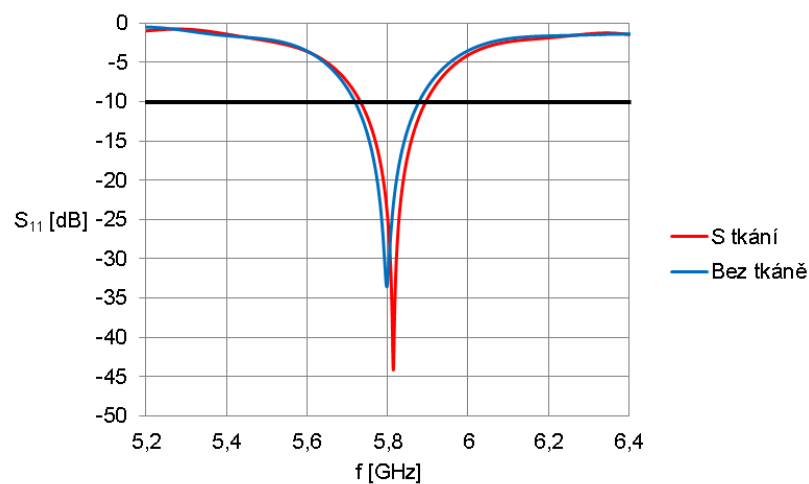
Obr. 5.7: Normované vyzařovací charakteristiky anténní řady Vivaldi v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně



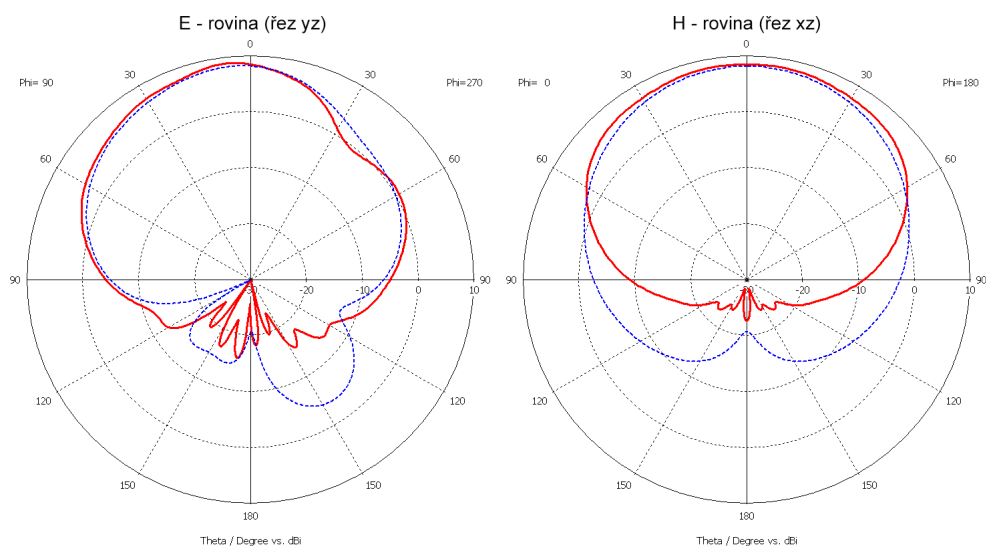
Obr. 5.8: Vyzařování anténní řady Vivaldi v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: a) bez tkáně b) s tkání

5.3 Flíčková anténa v blízkosti fantomu

Simulace flíčkové antény v blízkosti lidské tkáně (10 mm nad fantomem) ukazuje menší účinek fantomu (obr. 5.11), neboť flíčková anténa má po celé své ploše zemní plochu a její polarizace je kolmá vůči tkáni. Tím je přizpůsobení flíčkové antény lépe odolné (obr. 5.9). Ovšem fantom má vliv na zadní lalok, který je potlačen (obr. 5.10). Výborné vlastnosti flíčkové antény se projeví i na celkové účinnosti, která je rovna 93 % (tab. 5.3).



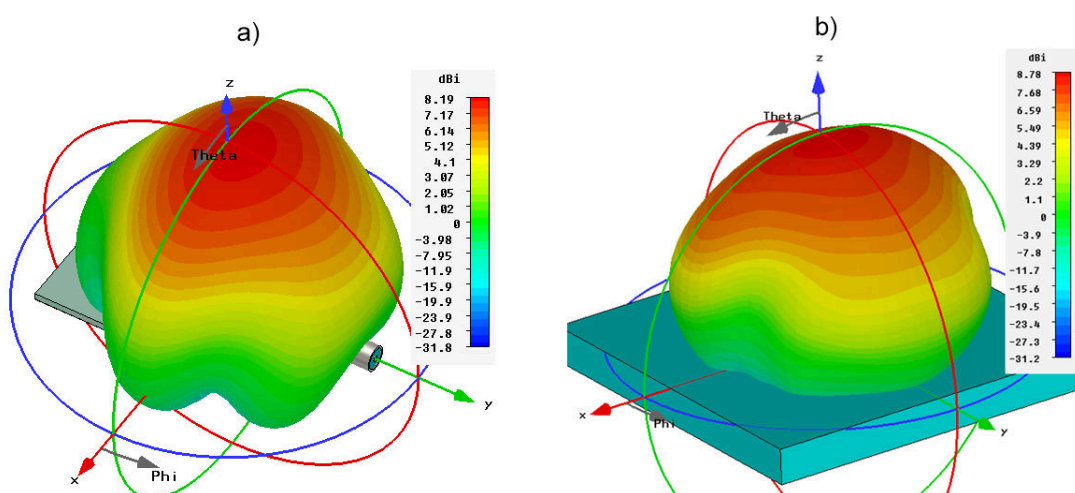
Obr. 5.9: Činitel odrazu na vstupu flíčkové antény v blízkosti fantomu



Obr. 5.10: Normované vyzařovací charakteristiky flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně

Tab. 5.4: Parametry pro flíčkovou anténu v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz

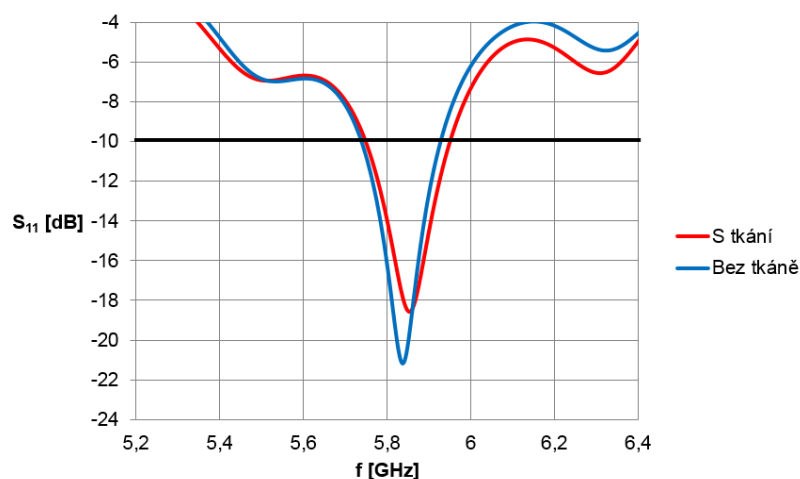
	Zisk [dBi]	S_{11} [dB]	PSV [-]	η_{tot} [%]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]
S tkání	8,81	-24,6	1,1	93	60	101	5,78
Bez tkáně	8,1	-34	1,1	96	66	85	6,24



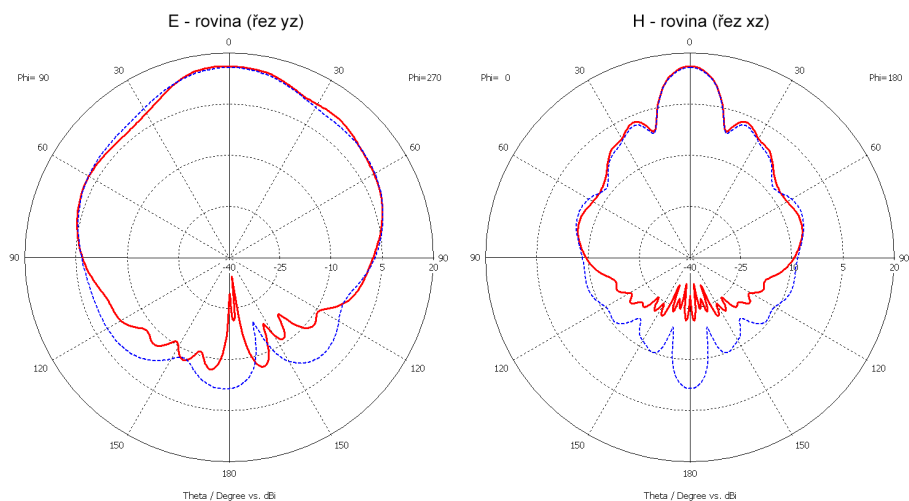
Obr. 5.11: Vyzařování flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz:
a) bez tkáně b) s tkání

5.4 Anténní flíčková řada v blízkosti fantomu

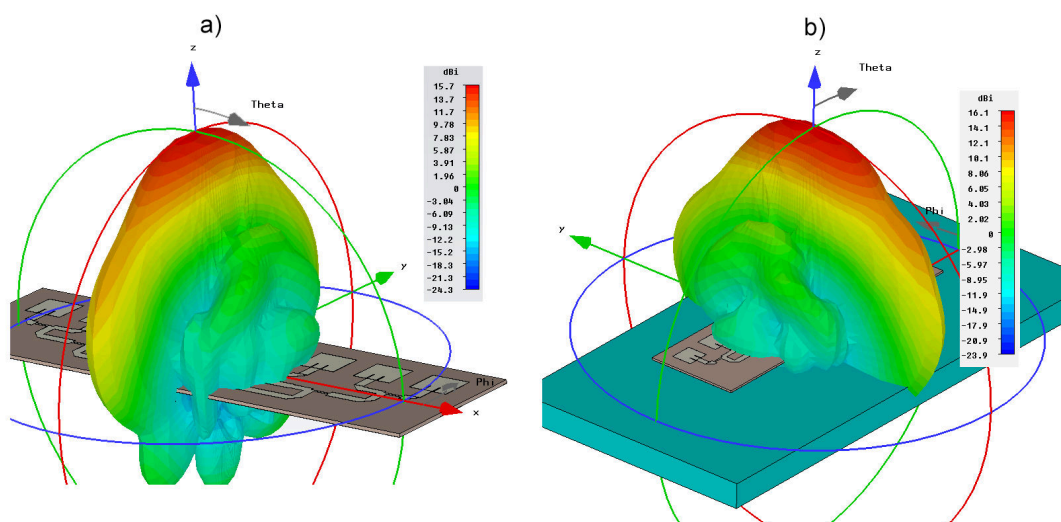
Pro ověření chování anténní řady je nutno v simulaci použít dva fantomy vedle sebe s celkovou šířkou 40 cm. V praxi bude realizován pouze jeden element anténní řady. Výhody flíčkové antény byly popsány v předešlé podkapitole a řada těchto antén přebírá její vlastnosti. Bohužel flíčková anténa je úzkopásmová a šířka pásma se projeví i na anténní řadě (obr. 5.12). Další nevýhodou flíčkové řady je potlačení bočních laloků -14 dB (obr. 5.13). Hlavní lalok vyzařovací charakteristiky řady vykazuje šířku 39° (tab. 5.4) v kolmém směru vůči lidské tkáni (obr. 5.14).



Obr. 5.12: Činitel odrazu na vstupu anténní flíčkové řady v blízkosti fantomu



Obr. 5.13: Normované vyzařovací charakteristiky anténní flíčkové řady v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - s tkání; modrá křivka - bez tkáně



Obr. 5.14: Vyzařování anténní flíčkové řady v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz: a) bez tkáně b) s tkání

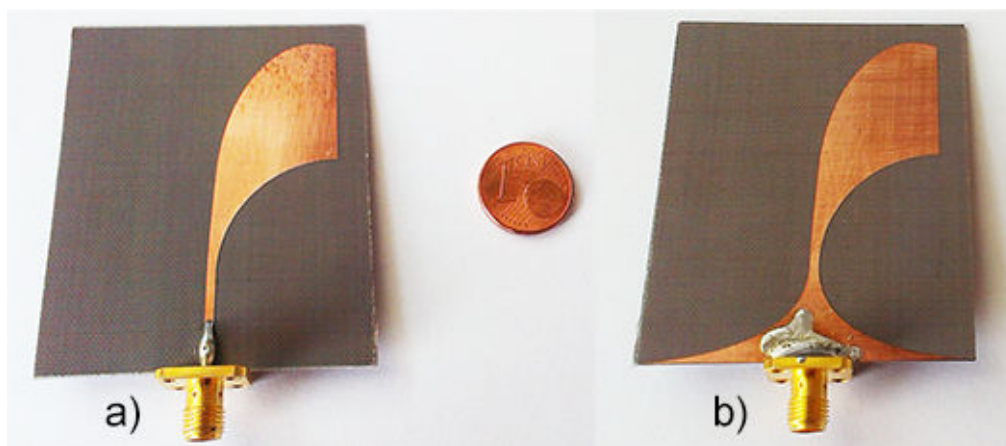
Tab. 5.5: Parametry pro flíčkovou anténní řadu v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz

	Zisk [dBi]	SL [dB]	S_{11} [dB]	η_{tot} [%]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]
S tkání	16	-13,1	-13,4	83	39	14	64
Bez tkáně	15,7	-13,7	-16,5	93	41	14	61

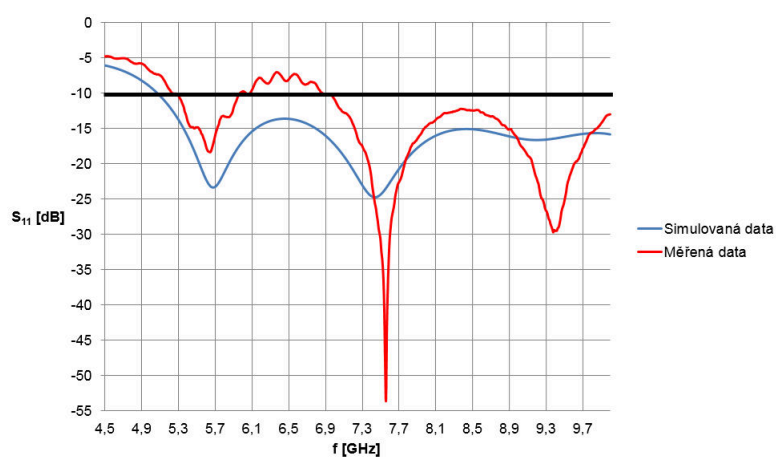
6 PRAKTICKÁ REALIZACE JEDNOTLIVÉHO ELEMENTU ŘADY

6.1 Vivaldi anténa

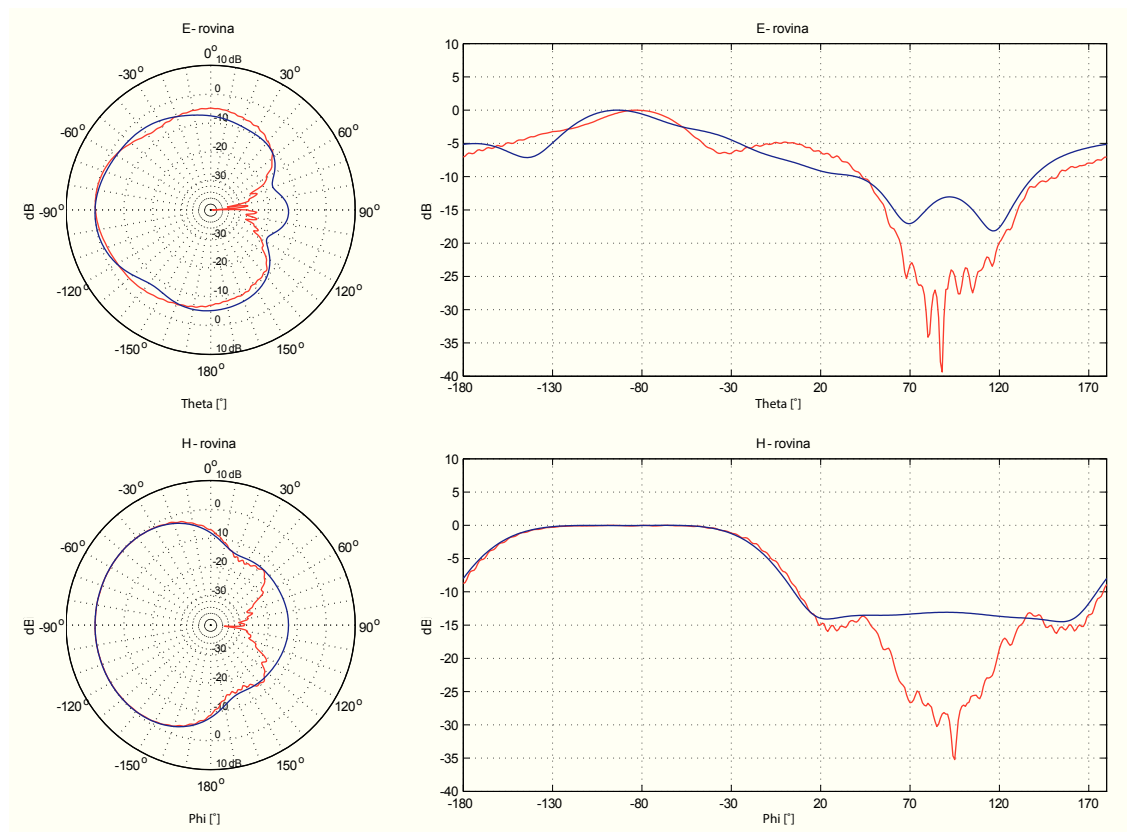
Činitel odrazu vyrobené Vivaldi antény (obr. 6.1) byl změřen vektorovým obvodo-
vým analyzátozem R&S ZLV. Na grafu činitele odrazu (obr. 6.2) si lze povšimnout
zvlnění, které je způsobeno méně dotaženým konektorem během kalibrace přístroje.
Přizpůsobení na pracovním kmitočtu 5,8 GHz je rovno -13,3 dB. Zhoršené přizpůso-
bení antény -7 dB v pásmu 6,1 GHz až 6,9 GHz je způsobeno reálnými vlastnostmi
substrátu. Použitelné pásmo odpovídá simulovanému pásmu 5,3 GHz až 10 GHz.



Obr. 6.1: Vyrobená anténa Vivaldi: a) Přední část b) Zadní část



Obr. 6.2: Činitel odrazu na vstupu vyrobené Vivaldi antény

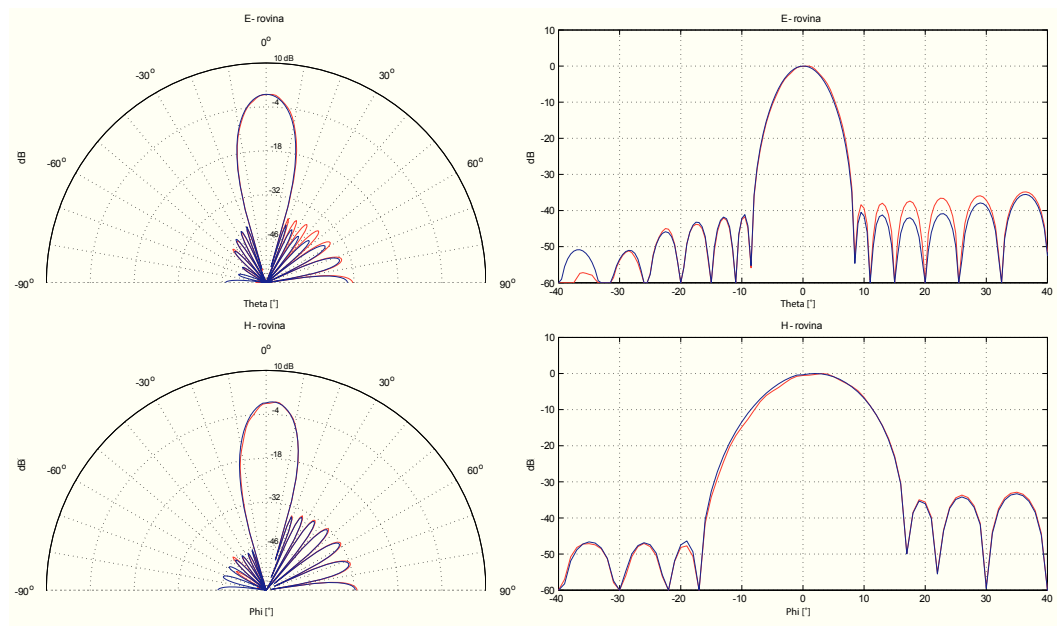


Obr. 6.3: Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi antény při frekvenci 5,8 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez xz)

Tab. 6.1: Parametry vyrobené Vivaldi antény při frekvenci 5,8 GHz

	Zisk [dBi]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]	S_{11} [dB]
Reálná data	5	68	146	3,53	-13,3
Simulovaná data	5	73	144	3,33	-21,2

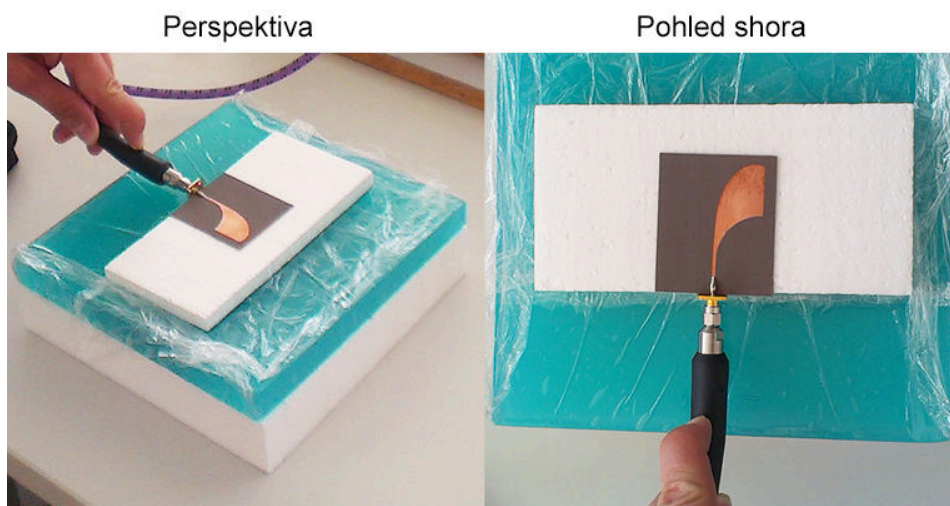
Naměřené vyzařovací charakteristiky vykazují v zadní části větší rozdíl hodnot oproti simulovaným dat, což je způsobené držákem a kabelem (obr. 6.3). Šířka hlavního laloku vyrobené antény je rovna 68° pro rovinu E, pro H je šířka rovna 146° (tab. 6.1). Činitel směrovosti D vychází pro vyrobenou anténu 3,53. Dále byl změřen zisk 5 dBi, který odpovídá i simulované anténě z programu CST. Z reálných dat byla pomocí skriptu analyzována anténní řada o osmi elementech (obr. 6.4). Analýza ukazuje potlačení -35 dB.



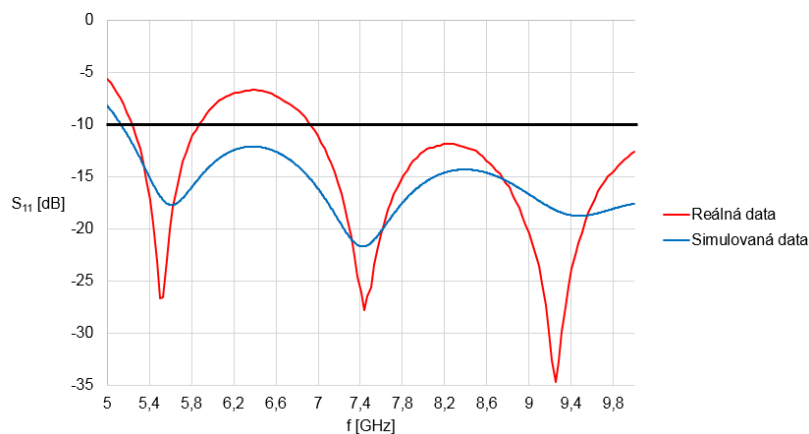
Obr. 6.4: Normované vyzařovací charakteristiky Vivaldi řady o osmi elementech: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez xz)

6.2 Vivaldi anténa v blízkosti fantomu

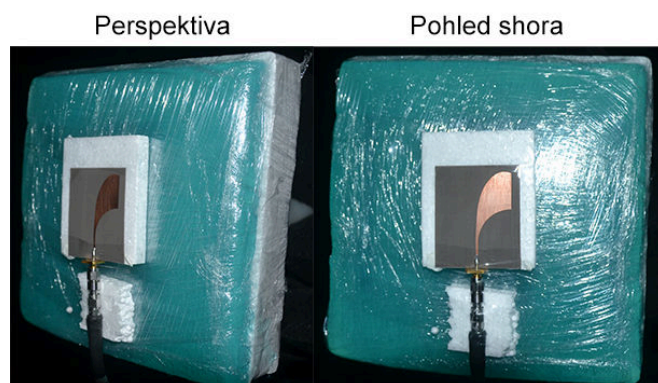
Činitel odrazu na vstupu Vivaldi antény byl měřen 10 mm od fantomu lidské tkáně. Polystyrén představuje oblečení (obr. 6.5). Výsledek ukazuje zhoršené přizpůsobení v pásmu 6 až 7 GHz (obr. 6.6).



Obr. 6.5: Měření činitele odrazu vyrobené Vivaldi antény v blízkosti fantomu



Obr. 6.6: Činitel odrazu na vstupu vyrobené Vivaldi antény v blízkosti fantomu

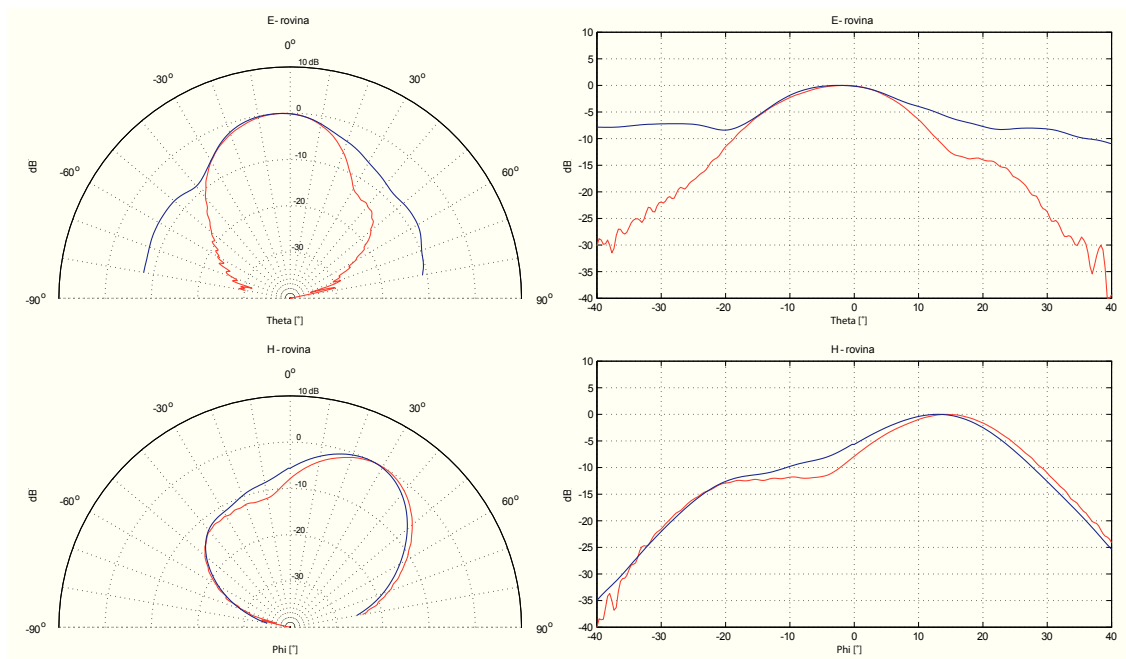


Obr. 6.7: Měření vyzařovacích charakteristik vyrobené Vivaldi antény v bezodrazové komoře

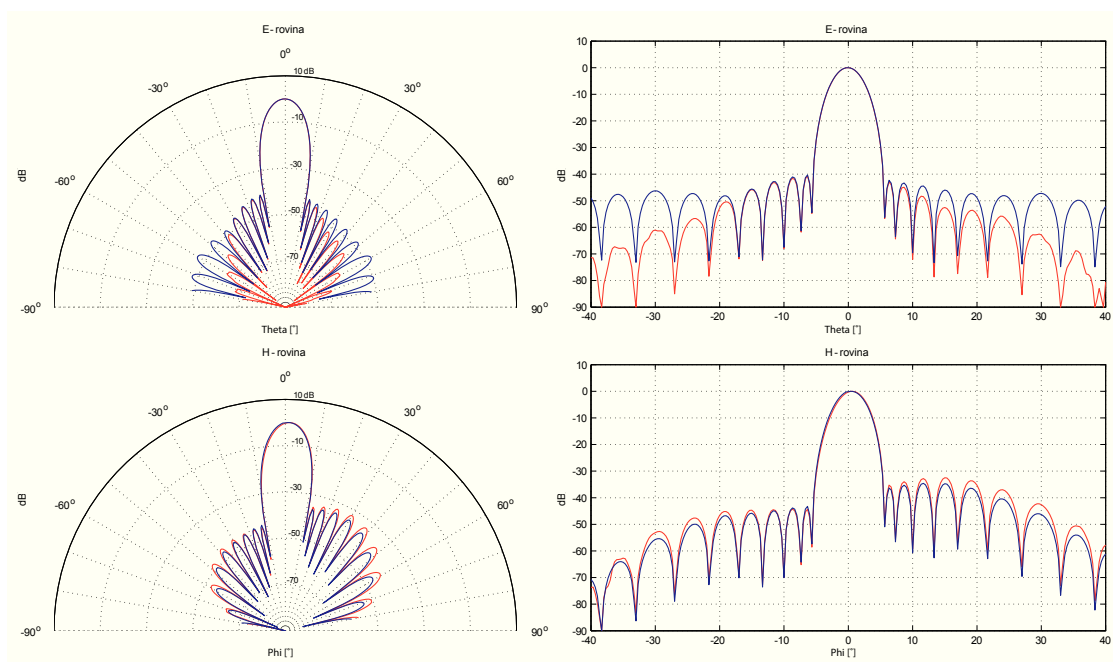
Tab. 6.2: Parametry vyrobené Vivaldi antény v blízkosti fantomu při frekvenci 5,8 GHz

	Zisk [dBi]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]	S_{11} [dB]
Reálná data	9,25	37	44	21	-11,5
Simulovaná data	10,40	58	50,0	12,1	-21,2

Vyzařovací charakteristiky se měřily v bezodrazové komoře (obr. 6.7, obr. 6.8) pouze v rozsahu úhlů -120° až 120° . Důvodem byl připevněný fantom. Šířka hlavního laloku vyrobené antény je rovna 37° pro rovinu E, pro H je šířka rovna 44° . Činitel směrovosti D vychází pro anténu 21 (tab. 6.2). Lidská tkáň vychyluje část vyzářené energie do 42° horního poloprostoru podle teoretického předpokladu. Pomocí skriptu byla analyzována anténní řada o osmi elementech (obr. 6.9). Analýza ukazuje potlačení -40 dB.



Obr. 6.8: Normované vyzářovací charakteristiky Vivaldi antény v blízkosti fantomu: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez yz)

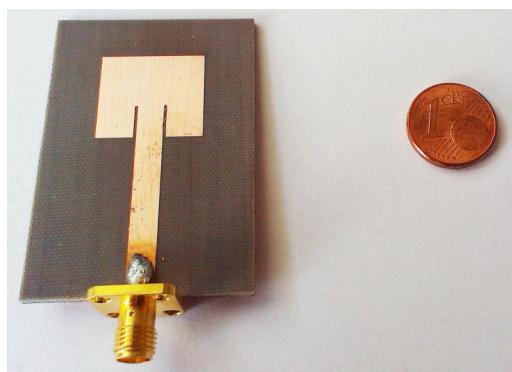


Obr. 6.9: Normované vyzářovací charakteristiky Vivaldi řady v blízkosti fantomu: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez xy) a H-rovina (řez yz)

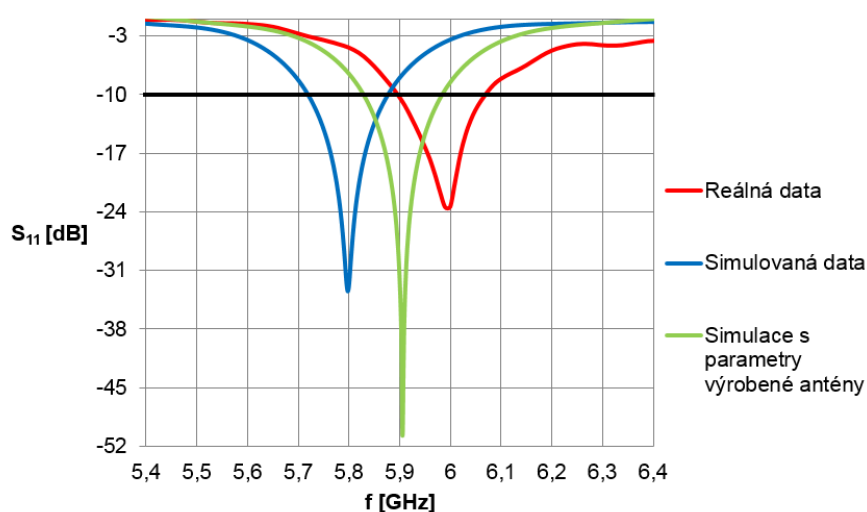
6.3 Flíčková anténa

Činitel odrazu vyrobené flíčkové antény (obr. 6.10) byl změřen vektorovým obvodovým analyzátozem R&S ZLV. Na grafu činitele odrazu (obr. 6.11) lze spatřit posunutí rezonančního kmitočtu ze simulovaných 5,8 GHz na 6 GHz.

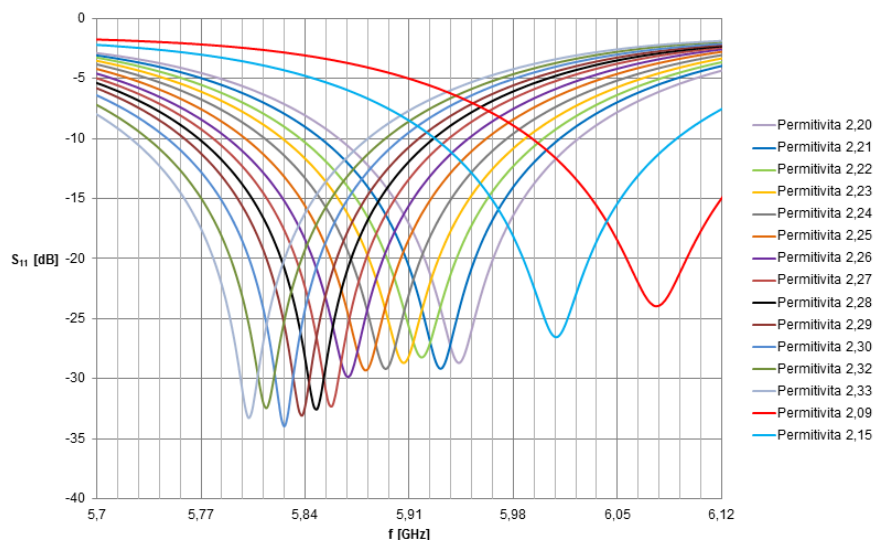
Pro objasnění posunutí rezonančního kmitočtu o 200 MHz byly změřeny parametry vyrobené antény a následně byla provedena simulace v CST s reálnými parametry. Simulace (obr. 6.11) ukazuje posunutí rezonančního kmitočtu o 100 MHz. Vliv na posunutí tohoto kmitočtu může být způsoben špatnou tolerancí permitivity substrátu. Na grafu (obr. 6.12) byla provedena simulace v programu CST, kdy byla měněna permitivita substrátu. Z výsledku vychází, že reálná permitivita substrátu může odpovídat 2,15 oproti 2,33.



Obr. 6.10: Vyrobená flíčková anténa

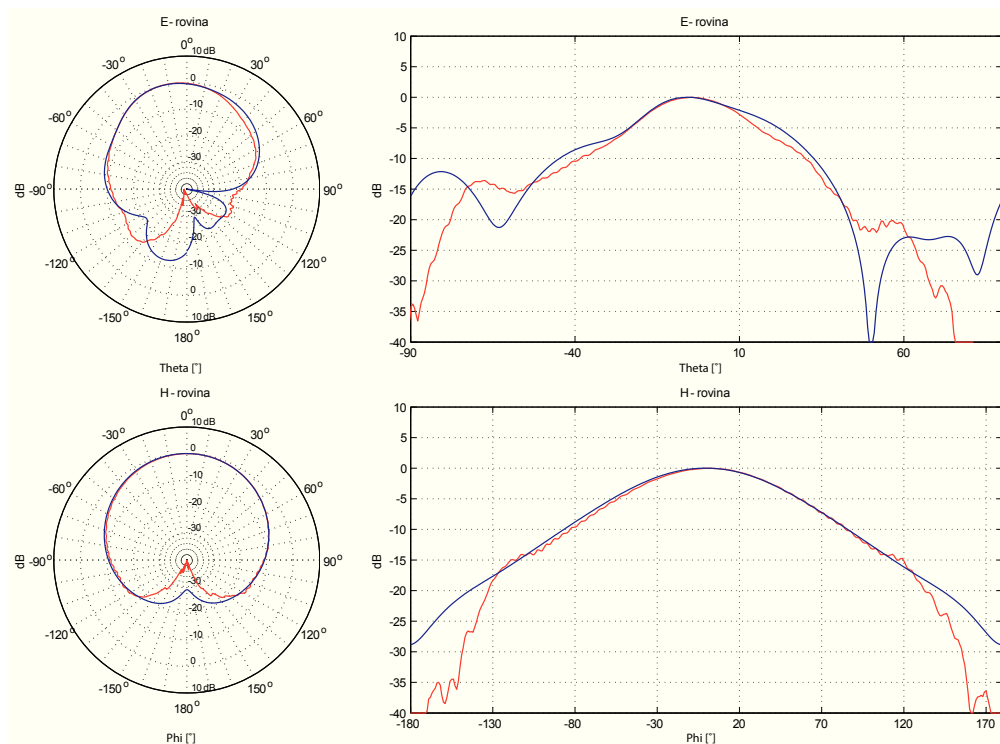


Obr. 6.11: Činitel odrazu na vstupu vyrobené flíčkové anténě



Obr. 6.12: Závislost činitele odrazu při změně permitivity substrátu

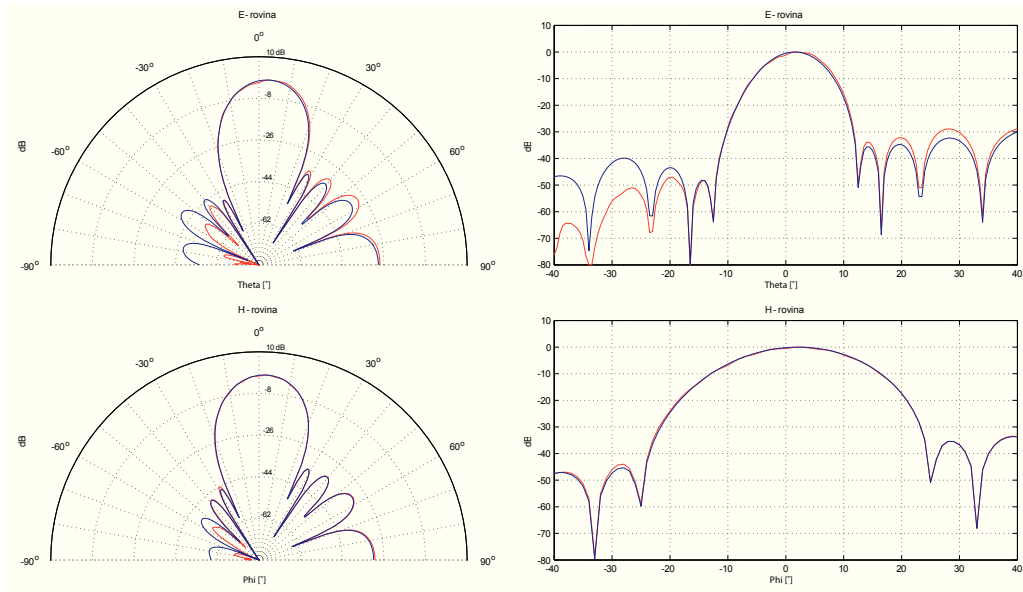
Ze směrových charakteristik je patrný zadní lalok, jehož přítomnost je způsobena delší napájecí částí (obr. 6.13). Lidská tkáň tento lalok utlumí, proto není jeho výskyt nijak závažný. Anténa má zisk 8,16 dBi (tab. 6.3).



Obr. 6.13: Normované vyzařovací charakteristiky vyrobené flíčkové antény při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)

Tab. 6.3: Parametry vyrobené flíčkové antény při frekvenci 6 GHz

	Zisk [dBi]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]	S_{11} [dB]
Reálná data	8,21	58	83	7,27	-23,44
Simulovaná data	8,10	66	85	6,24	-

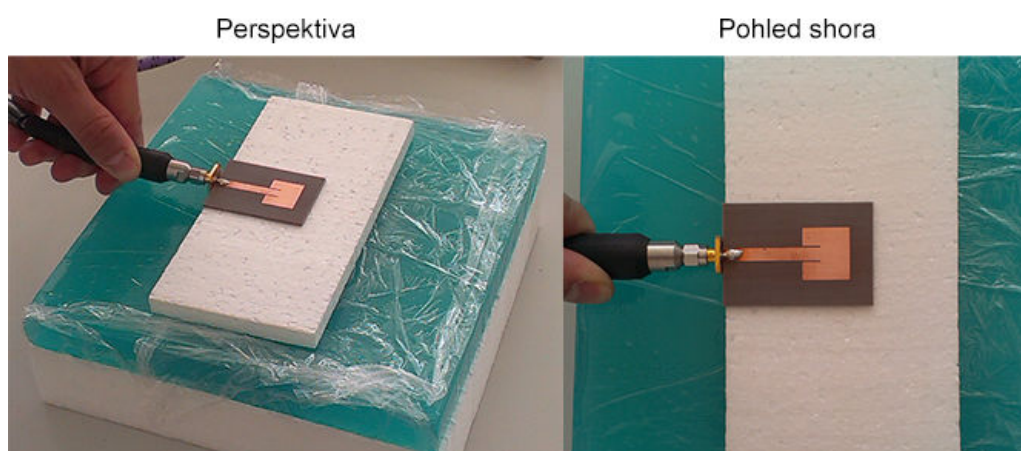


Obr. 6.14: Normované vyzářovací charakteristiky anténní flíčkové řady při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)

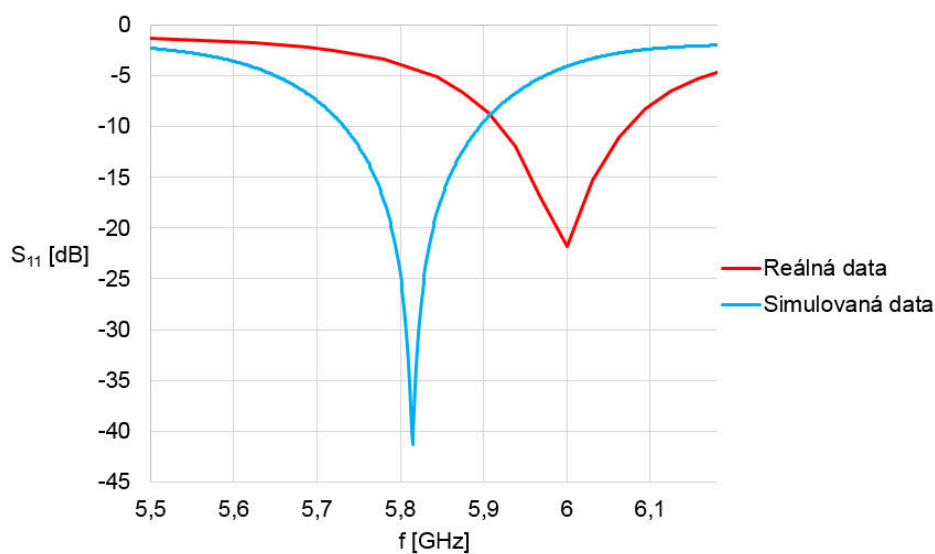
Šířka hlavního laloku měřené antény je rovna 58° pro rovinu E, pro H je šířka rovna 83° . Činitel směrovosti D vychází pro měřenou anténu 7,27 oproti simulované anténě 6,24. Pomocí skriptu byla analyzována anténní řada o osmi elementech (obr. 6.14). Analýza ukazuje potlačení -29 dB.

6.4 Flíčková anténa v blízkosti fantomu

Činitel odrazu na vstupu flíčkové antény byl měřen 10 mm od fantomu lidské tkáně (obr. 6.15). Výsledek ukazuje posunutí rezonančního kmitočtu o 200 MHz (obr. 6.16). Vyzařovací charakteristiky byly měřeny od -120° do 120° z důvodu přítomnosti fantomu. Rozkmitání ve spodní části charakteristiky roviny H je způsobeno odrazy na vstupu antény. (obr. 6.17). Zadní lalok je potlačen, neboť lidská tkáň směřuje energii do horního poloprostoru.



Obr. 6.15: Měření činitele odrazu vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu

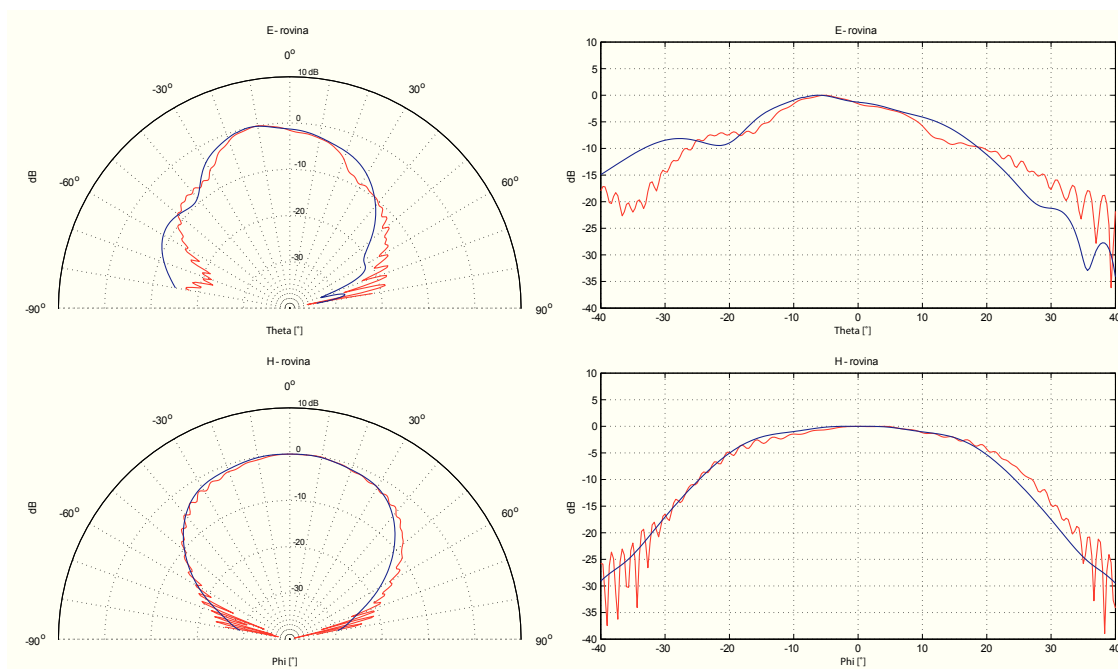


Obr. 6.16: Činitel odrazu na vstupu vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu

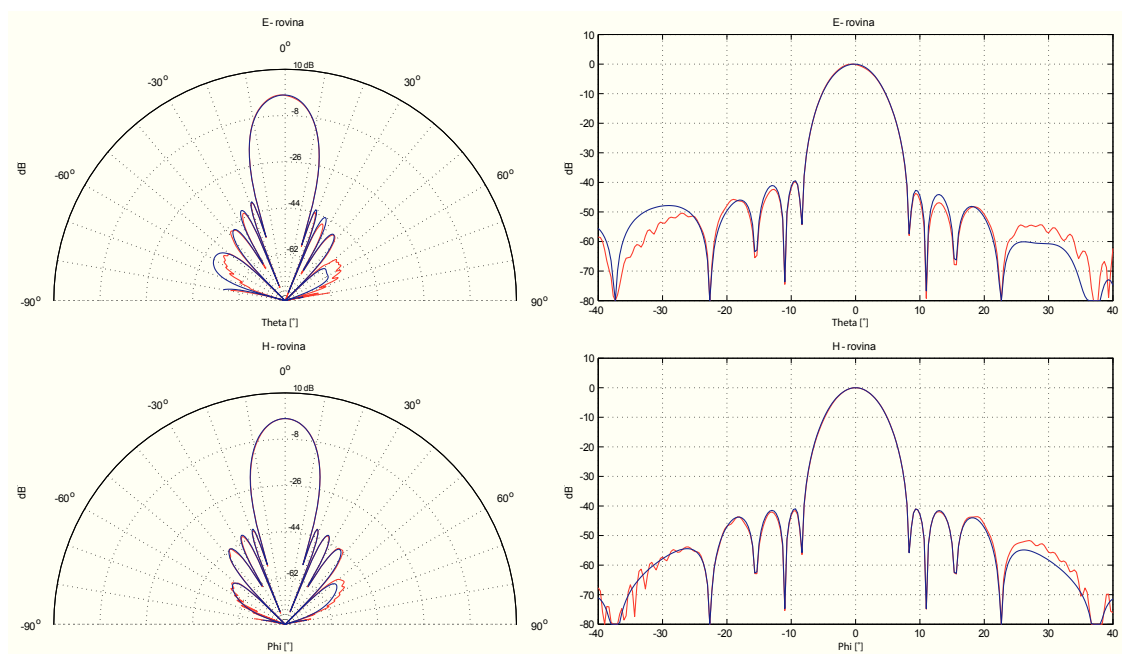
Šířka hlavního laloku antény vychází 55° pro rovinu E, pro H je šířka rovna 98° . Činitel směrovosti D vychází pro anténu 6,5 (tab. 6.4). Lidská tkáň vychyluje část vyzařené energie do 42° horního poloprostoru. Pro ověření anténní řady v blízkosti fantomu lidské tkáně byly nahrány vyzařovací charakteristiky do skriptu a v něm byla analyzována řada o osmi elementech (obr. 6.18). Potlačení řady je rovno -40 dB.

Tab. 6.4: Parametry vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 6 GHz

	Zisk [dBi]	θ_E [°]	θ_H [°]	D [-]	S_{11} [dB]
Reálná data	8,79	55	98	6,50	-21,79
Simulovaná data	8,81	60	101	5,78	-



Obr. 6.17: Normované vyzařovací charakteristiky vyrobené flíčkové antény v blízkosti fantomu při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)



Obr. 6.18: Normované vyzařovací charakteristiky vyrobené flíčkové řady v blízkosti fantomu při frekvenci 6 GHz: červená křivka - reálná data; modrá křivka - simulovaná data; E-rovina (řez yz) a H-rovina (řez xz)

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce řeší principy anténních řad, na jejichž základě byl vytvořen skript v programu MATLAB. Základním parametrem je počet prvků v anténní řadě, směr záření hlavního svazku a odstup postranních laloků vůči hlavnímu laloku. Pomocí těchto parametrů dokáže skript určit vektor buzení, vypočítat skupinovou funkci záření a vykreslit požadovanou vyzařovací charakteristiku.

Dále byla navržena flíčková anténa v pracovním pásmu ISM 5,8 GHz. Z naměřených hodnot je patrné, že anténa září kolmo od lidské tkáně se ziskem 8 dBi. Vliv lidské tkáně na vyzařování je minimální, protože flíčková anténa má zemní rovinu po celé své ploše. Anténa je vhodná pro Off-Body komunikaci, neboť její polarizace je kolmá vůči tkáni. V simulacích bylo dokázáno, že anténní řada vykazuje stejný směr šíření elektromagnetické vlny, avšak se ziskem 16 dBi. Malá šířka pásma flíčkové anténní řady je obrovskou nevýhodou. V simulacích bylo dosaženo potlačení bočních laloků -14,5 dB.

Pro ověření On-Body komunikace byla navržena Vivaldi anténa se šířkou pásma 5 GHz. Po navržení napájecí sítě pro anténní řadu se snížila šířka pásma přibližně na 860 MHz. Anténní řada potlačuje boční laloky o -20 dB. Z reálného měření bylo zjištěno, že lidská tkáň vychýlí část energie jednotlivé antény do horního polo-prostoru ve směru 40°. Stejných výsledků se dosáhlo v řadě osmi elementech Vivaldi antén. Měřeními a simulacemi bylo dokázáno, že lidská tkáň na kmitočtu 5,8 GHz se chová částečně jako reflektor.

Závěrem je nutno poznamenat, že výsledné anténní řady jsou pro běžné použití rozměrné, neboť vlnová délka dosahuje při ISM 5,8 GHz centimetrových vln. Pro snížení velikosti je zapotřebí navrhnout pracovní pásmo na vyšší kmitočty. Na vyšších kmitočtech se používá technologie SIW, která efektivně potlačí boční laloky. V praxi pro kmitočty 5,8 GHz se použije jen jeden element anténní řady s šířkou 4 cm.

LITERATURA

- [1] MAILLOUX, R. J. *Phased Array Antenna Handbook*. Canton Street 685, Norwood: Artech House, INC., 2005. 2. ISBN 1-58053-689-1.
- [2] RAIDA, Z. *Elektromagnetické vlny, vedení a antény* [online]. 2002, poslední aktualizace 2014 [cit. 2014-10-27]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lecture/lect_07.pdf>.
- [3] RAIDA, Z. *Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny a Mikrovlnná technika* [online]. 2010, [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=4-4-A>>.
- [4] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, vedení a antény. Přednášky*. poslední aktualizace 2008. Skriptum FEKT VUT Brno.
- [5] ORFANIDIS, J. *Electromagnetic Waves and Antennas* [online]. 2002, poslední aktualizace 2.7.2014 [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: <<http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch20.pdf>>.
- [6] ORFANIDIS, J. *Electromagnetic Waves and Antennas* [online]. 2002, poslední aktualizace 2.7.2014 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <<http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch21.pdf>>.
- [7] LÁČÍK, J. *Návrh antén a rádiových spojů: Úvod, základní pojmy z teorie antén, modelování a analýza mikrovlnných obvodů a antén. Přednášky*. Skriptum FEKT VUT Brno, poslední aktualizace 2014.
- [8] ABBOSH, Amin M. *Directive Antenna for Ultrawideband Medical Imaging Systems* [online]. 2008, [cit. 2014-12-04]. Dostupné z: <<http://www.hindawi.com/journals/ijap/2008/854012/>>.
- [9] ZHANG, W. *Design of Modified 6-18 GHz Balanced Antipodal Vivaldi Antenna* [online]. 2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <<http://www.jpier.org/PIERC/pierc25/20.11101202.pdf>>.
- [10] MALHERBE, J. A. G. *Microwave Transmission Line Filters*. Artech House, INC., 1979. 1. ISBN 978-0890060636.
- [11] ANDREUCETTI, D. *Dielectric Properties of Body Tissues* [online]. 1997, poslední aktualizace 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A	Budící vektor
AF	Řadový faktor
B	Šířka pásma
BAN	Body Area Network
D	Činitel směrovosti
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
ε	Permitivita materiálu
ε_{ef}	Efektivní permitivita materiálu
g	Hloubka vnoření do flíčkové antény
ISM	Industrial, Scientific and Medical (ISM) radio bands
λ	Vlnová délka
L	Délka vodivé vrstvy
η_{tot}	Celková účinnost
PSV	Poměr stojatých vln
S_{11}	Činitel odrazu na vstupu antény
SIW	Substrate Integrated Waveguide, Vlnovod integrovaný do substrátu
s	Šířka vnoření do flíčkové antény
SL	Sidelobes
θ	Šířka hlavního laloku
UWB	Ultra Wideband
W	Šířka vodivé vrstvy
w	Šířka mikropásku
Z	Zisk antény

SEZNAM PŘÍLOH

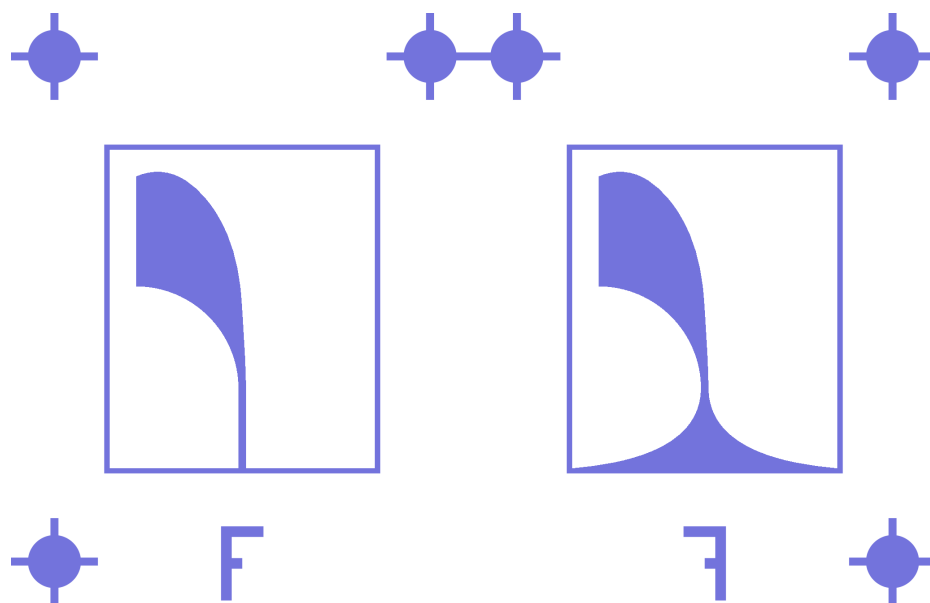
A Skript anténní řady	53
B Podklady pro výrobu antén	54
C Obsah přiloženého CD	55

A SKRIPT ANTÉNNÍ ŘADY

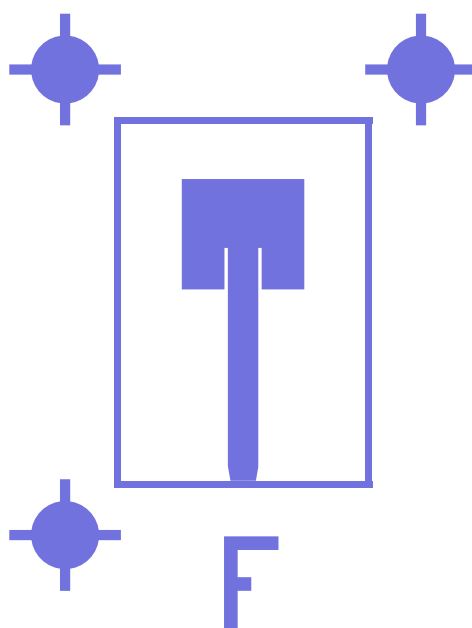
```
1 %% ----- Vektor uhlu pro vycisleni AF -----
2 theta = -180:1:180;
3 theta = theta*pi/180;
4 %% ----- Zacatek programu - Pole elementu -----
5 n=8; % Pocet elementu v antenni rade
6 ph0 = 30; % [ deg ] Vychylovaci uhel
7 ph0 = ph0 * pi/180; % [ rad ]
8
9 a = ones(1,n); % Vektor jednicek
10
11 dx = 0.5; % [ lambda ] Vzdalenost jednotlivych
12 % elementu
13 %% ----- Potlaceni bocnich laloku -----
14 d = 0:dx:dx*(length(a)-1); % Smer vektoru anten
15 SL = 30; % Odstup bocnich laloku vuci hlavniemu
16 Ra = 10^(SL/20); % Odlogaritmovani
17
18 zer = n-1;
19 x0 = cosh( acosh(Ra) / (n-1)); % Hranice vzrustu bocnich laloku
20 i = 1:zer;
21 xi = cos(pi * (i - 0.5)/zer);
22 psi = 2 * acos(xi/x0);
23 zi = exp(j * psi);
24
25 a = real(poly(zi));
26
27 phase = dx * sin(ph0); % [ m ] Fazove posunuti
28 N = length(a);
29 m = (0:N-1) - (N-1)/2; % Znamenkova symetrie
30
31 a = a .* exp(-j * 2*pi * m .* phase); % Vygenerovani vektoru buzeni
32 %% ----- Radovy faktor -----
33 kdx = 2*pi*d; % Zvoleny smer x kartezske soustavy
34
35 for i = 1:length(theta)
36     AF = a.*exp( 1i*( kdx*sin(theta(i)) ) );
37     IsG(i) = abs(sum(1*AF)).^2; % Izotropni zaric
38 end;
```

Obr. A.1: Skript pro syntézu anténního pole

B PODKLADY PRO VÝROBU ANTÉN



Obr. B.1: Přední a zadní pohled Vivaldi antény



Obr. B.2: Přední pohled flíčkové antény

C OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

2. kapitola - Anténí lineární řada

- Skript syntéza pole
 - Soubor vyzařovacích charakteristik
 - Dirplot.m
 - e rovina viv.tab
 - h rovina viv.tab
 - synteza pole.m
- Skript syntéza pole - popis
 - synteza pole popis.m

3. kapitola - Návrhy a simulace antén v CST

- 3.2 podkapitola - Flíčková anténa
 - Flickova antena.cst
 - Flickova antena SMA.cst
 - Flickova antena VYROBA.cst
 - flickova TOP.pdf
- 3.3 podkapitola - Vivaldi anténa
 - Vivaldi antena.cst
 - Vivaldi antena SMA.cst
 - Vivaldi antena VYROBA.cst
 - vivaldi BOTTOM.pdf
 - vivaldi TOP.pdf

4. kapitola - Napájecí síť

- 4.1 podkapitola - Flíčková anténa
 - Napajeci sit pro radu Vivaldi.cst
 - Overeni budiciho vektoru.cst
 - Rada Vivaldi anten.cst
 - Rada Vivaldi anten SMA.cst
- 4.2 podkapitola - Vivaldi anténa
 - Napajeci sit pro radu flickovych anten.cst
 - Overeni budiciho vektoru.cst
 - Rada flickovych anten.cst
 - Rada Vivaldi flickovych anten SMA.cst
 - Spolecna vazba mezi elementy.cst

5. kapitola - Simulace antény v blízkosti lidské tkáně

- 5.1 podkapitola - Vivaldi anténa v blízkosti fantomu
 - Vivaldi antena SMA fantom.cst
- 5.2 podkapitola - Anténní řada Vivaldi v blízkosti fantomu
 - Rada Vivaldi anten SMA fantom.cst
- 5.3 podkapitola - Flíčková anténa v blízkosti fantomu
 - Flickova antena SMA fantom.cst
- 5.4 podkapitola - Anténní flíčková řada v blízkosti fantomu
 - Rada flickovych anten SMA fantom.cst

6. kapitola - Praktická realizace jednotlivého elementu řady

- 6.1 podkapitola - Vivaldi anténa
 - komora viv 1n.pdf
 - komora viv 1n tkan.pdf
 - komora viv e.tab
 - komora viv e tkan.tab
 - komora viv h.tab
 - komora viv h tkan.tab
- 6.2 podkapitola - Vivaldi anténa v blízkosti fantomu
 - komora viv 8n.pdf
 - komora viv 8n tkan.pdf
- 6.3 podkapitola - Flíčková anténa
 - komora patch 1n.pdf
 - komora patch 1n tkan.pdf
 - komora patch e.tab
 - komora patch e tkan.tab
 - komora patch h.tab
 - komora patch h tkan.tab
 - Odsimulovane realne parametry flickove anteny.cst
 - Zavislost zmeny permitivity na S11.cst
- 6.4 podkapitola - Flíčková anténa v blízkosti fantomu
 - komora patch 8n.pdf
 - komora patch 8n tkan.pdf
- Pomocný skript pro vykreslení
 - vykresleni komora 180.m
 - vykresleni komora 360.m
 - Dirplot.m